



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

해상교통관제사 관점에서의 선박충돌위험도 평가모델 개발에 관한 연구

The Development of the Ship Collision Risk Model from the VTSO's Viewpoint



지도교수 송재욱

2017 년 8 월

한국해양대학교 대학원

항해학과

이 진 석



본 논문을 이진석의 공학박사 학위논문으로 인준함

위원장 : 박진수



위원 : 송재욱



위원 : 박영수



위원 : 예병덕



위원 : 문성배



2017 년 6 월 22 일

한국해양대학교 대학원

목 차

| | |
|-----------------------|----|
| List of Tables | iv |
| List of Figures | vi |
| Abstract | ix |

| | |
|---|----|
| 제 1 장 서 론 | 1 |
| 1.1 연구 배경 및 목적 | 1 |
| 1.2 연구 방법 | 3 |
| 제 2 장 국내외 해상교통 평가모델 조사 및 분석 | 7 |
| 2.1 PAWSA | 7 |
| 2.1.1 PAWSA 평가 절차 | 7 |
| 2.1.2 평가 결과 | 10 |
| 2.2 IWRAP | 13 |
| 2.2.1 IWRAP 평가 절차 | 14 |
| 2.2.2 기하학적 충돌확률 계산 방법 | 16 |
| 2.2.2.1 Crossing 상태에서의 충돌확률 | 16 |
| 2.2.2.2 Head-on 및 Overtaking 상태에서의 충돌확률 | 18 |
| 2.2.3 평가 결과 | 19 |
| 2.3 ES 모델 | 22 |
| 2.3.1 환경 스트레스치 계산 방법 | 23 |
| 2.3.2 부산항 인근 해역 평가 결과 | 26 |
| 2.4 PARK 모델 | 28 |
| 2.4.1 PARK 모델 계산 방법 | 28 |
| 2.4.2 평가 결과 | 30 |
| 2.5 그 외 평가모델 | 31 |
| 2.5.1 Sech 함수를 이용한 충돌위험도 | 31 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 2.5.2 | 퍼지기반 충돌위험도 추정 알고리즘 | 32 |
| 2.5.3 | Safety Index를 이용한 안전평가 방법 | 33 |
| 2.6 | 조사 분석 결과 종합 | 34 |
| 제 3 장 | VTSO의 선박 충돌 위험지수 | 39 |
| 3.1 | VTSO의 충돌 위험 정도 조사 방법 | 40 |
| 3.2 | 선박 조우 상황에 따른 위험지수 | 41 |
| 3.2.1 | CPA와 TCPA를 이용한 충돌위험 평가의 한계 | 42 |
| 3.2.2 | CPA에서의 상대방위에 따른 선박 조우 상황 분석 | 46 |
| 3.2.3 | CPA에서의 상대방위에 따른 위험지수 | 56 |
| 3.2.4 | 설문 분석을 통한 위험지수의 검증 | 64 |
| 3.3 | 선박 간 최단 접근시간에 따른 위험지수 | 73 |
| 3.3.1 | 선박 간 접근시간에 따른 VTSO 위험 분석 | 73 |
| 3.3.2 | 접근시간에 미치는 영향에 따른 위험지수 | 80 |
| 3.4 | 선박 간 근접 거리에 따른 위험지수 | 83 |
| 3.4.1 | Ship domain 관련 국내외 연구 | 83 |
| 3.4.2 | VTSO의 Safety domain | 88 |
| 3.4.3 | Approach factor에 따른 위험지수 | 92 |
| 3.4.4 | Safety domain을 이용한 위험지수의 검증 | 96 |
| 제 4 장 | VTSO 위험 태도에 따른 충돌위험도 평가모델 개발 | 103 |
| 4.1 | 위험 인식과 위험 태도 | 103 |
| 4.2 | 설문분석을 통한 VTSO 위험 태도 연구 | 109 |
| 4.3 | VTSO 개인별 위험 태도 분석 | 131 |
| 제 5 장 | 선박 충돌위험도 평가모델 검증 | 139 |
| 5.1 | 교통 환경 스트레스치를 이용한 위험도 추정 | 139 |
| 5.2 | 충돌 사고 사례 적용 | 141 |
| 5.3 | 관제구역 내 준사고 사례 적용 | 147 |
| 5.3.1 | 부산 신항 출항선과 부산항 입항선과의 준사고 | 147 |
| 5.3.2 | 부산항 출항선과 부산 신항 입항선과의 준사고 | 154 |
| 5.4 | 검증 결과 종합 | 162 |

| | |
|--|-----|
| 제 6 장 결 론 | 165 |
| 참고문헌 | 169 |
| 부록 I. 조우상황(방위)에 따른 선박 충돌위험도 연구 설문지 | 176 |
| 부록 II. 여유시간과 이격거리에 따른 선박충돌위험도 연구 설문지 ... | 183 |
| 감사의 글 | 197 |



List of Tables

| | | |
|-----------|---|-----|
| Table 2.1 | Specific Actions in PAWSA | 12 |
| Table 2.2 | Default Causation Probability Factors in IWRAP | 15 |
| Table 2.3 | The number of collision and grounding | 20 |
| Table 2.4 | Analysis result of risk assessment models | 35 |
| Table 3.1 | Patterns of Encounter situation due to θ_i | 58 |
| Table 3.2 | Relative risk interval due to θ_i | 61 |
| Table 3.3 | Risk value and E_{ij} for each Fig. | 63 |
| Table 3.4 | Survey results of VTSOs and OoWs | 67 |
| Table 3.5 | One-Way ANOVA according to each encounter situation | 67 |
| Table 3.6 | Survey results of VTSOs due to time-remaining | 74 |
| Table 3.7 | Japanese OoW' s ship domain in narrow waters | 86 |
| Table 3.8 | The result of one sample T-test for survey (N=70) | 89 |
| Table 3.9 | Example calculation of A_{ij} | 101 |
| Table 4.1 | Explanation of terms of utility | 105 |
| Table 4.2 | Survey basic data of VTSO | 110 |
| Table 4.3 | Value of $CoRi$ associated with risk attitudes | 132 |
| Table 4.4 | The result of risk attitudes and corr. coefficient as compared with $CoRi$ and each VTSO | 133 |
| Table 4.5 | Risk attitude analysis results of VTSO | 137 |
| Table 5.1 | Ship' s particular of D & H | 142 |
| Table 5.2 | Speed and Course of D & H | 142 |
| Table 5.3 | Collision risk value of D & H | 143 |
| Table 5.4 | Ship' s particular of G & P | 148 |
| Table 5.5 | Speed and Course of G & P | 149 |
| Table 5.6 | Collision risk value of G & P | 150 |

| | |
|--|-----|
| Table 5.7 Ship' s particular of M & C | 155 |
| Table 5.8 Speed and Course of M & C | 156 |
| Table 5.9 Collision risk value of M & C | 157 |
| Table 5.10 Risk ranking of ES_S and $CoRi$ | 163 |



List of Figures

| | |
|---|----|
| Fig. 1.1 Flow chart of study | 5 |
| Fig. 2.1 The five main steps of PAWSA process | 8 |
| Fig. 2.2 Risk factors in PAWSA | 10 |
| Fig. 2.3 Baseline Risk Levels in PAWSA | 11 |
| Fig. 2.4 Mitigation Effectiveness in PAWSA | 11 |
| Fig. 2.5 Additional Interventions in PAWSA | 12 |
| Fig. 2.6 IWRAP process with traffic distribution | 14 |
| Fig. 2.7 Route Leg editor(Lateral Distribution) | 15 |
| Fig. 2.8 Crossing waterways with traffic distribution | 17 |
| Fig. 2.9 The evaluation results of ULSAN(up) and WANDO(down) through IWRAP | 21 |
| Fig. 2.10 Schematic figure of Aggregation of ES value | 23 |
| Fig. 2.11 Stress Ranking and Acceptance Criteria | 25 |
| Fig. 2.12 The evaluation result of BUSAN through ES Model | 27 |
| Fig. 2.13 The evaluation result of BUSAN coastal area through ES Model | 27 |
| Fig. 2.14 Example of survey form | 30 |
| Fig. 2.15 Hazard maps | 31 |
| Fig. 2.16 Hazard maps (Nguyen,2013) | 34 |
| Fig. 3.1 CPA & DCPA Prediction function of VTS system | 43 |
| Fig. 3.2 Encounter Situations when CPA and TCPA are same | 45 |
| Fig. 3.3 Comparative of θ_i and θ_j | 46 |
| Fig. 3.4 Change of θ_j , $Co.j$ and v_j when θ_i is 45° | 48 |
| Fig. 3.5 Change of θ_j , $Co.j$ and v_j when θ_i is 135° | 50 |
| Fig. 3.6 Change of θ_j , $Co.j$ and v_j when θ_i is 225° | 52 |
| Fig. 3.7 Change of θ_j , $Co.j$ and v_j when θ_i is 315° | 54 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 3.8 Comparison of VTS' s and Vessel' s viewpoints | 56 |
| Fig. 3.9 Encounter angle classification due to Head-on, Crossing and Overtaking situation | 57 |
| Fig. 3.10 Value of the risk by Relative Bearing in the Point of CPA | 62 |
| Fig. 3.11 Image and Definition of OZT | 64 |
| Fig. 3.12 Alarm areas for different target encountered angles | 65 |
| Fig. 3.13 Encountering situations presented in the survey | 68 |
| Fig. 3.14 Comparison of Average of survey & Degree of Risk | 71 |
| Fig. 3.15 Means of VTSO' s risk for each situation due to Time-remaining | 78 |
| Fig. 3.16 A Graph of the Risk of approach time(R_{at}) | 79 |
| Fig. 3.17 The effect of main and detail factors | 82 |
| Fig. 3.18 Fujii' s domains | 84 |
| Fig. 3.19 Coldwell' s domains | 84 |
| Fig. 3.20 Goodwin' s Domain | 85 |
| Fig. 3.21 Davis' s Domain (Arena) | 86 |
| Fig. 3.22 Vessel safety domains for approximately 100m of LOA | 87 |
| Fig. 3.23 Safety domains of VTSO | 88 |
| Fig. 3.24 Mean of VTSO' s safety domain | 89 |
| Fig. 3.25 Proposed the safety domain of VTSO | 90 |
| Fig. 3.26 Process of induction for the safety domain | 91 |
| Fig. 3.27 Impact comparison of TCPA and CPA on Ship Domain | 91 |
| Fig. 3.28 Safety domain on the point of TCPA | 94 |
| Fig. 3.29 Definition of Approach factor | 94 |
| Fig. 3.30 A Graph of the Risk of Safety domain(R_{sd}) | 95 |
| Fig. 3.31 Predicted violation of the safety domain in head-on situation | 97 |
| Fig. 3.32 Risk of Approach(A_{ij}) in Crossing situation (Stbd 045°) | 98 |
| Fig. 3.33 Risk of Approach(A_{ij}) in Crossing situation (Stbd 095°) | 99 |
| Fig. 3.34 Risk of Approach(A_{ij}) in Crossing situation (Stbd 135°) | 100 |


| | | |
|-----------|---|-----|
| Fig. 4.1 | Utility functions of the risk attitude | 106 |
| Fig. 4.2 | Collision Risk associated with different VTSO' s risk attitudes | 109 |
| Fig. 4.3 | The situation presented in the questionnaire (left or up) and Individual risk of VTSO(right or down) | 123 |
| Fig. 4.4 | Comparison of risk level by VTSO' s experience (Situation 1) | 125 |
| Fig. 4.5 | Comparison of risk level by VTSO' s experience (Situation 2) | 126 |
| Fig. 4.6 | Comparison of risk level by VTSO' s experience (Situation 3) | 127 |
| Fig. 4.7 | Comparison of risk level by VTS center (Situation 1) | 128 |
| Fig. 4.8 | Comparison of risk level by VTS center (Situation 2) | 129 |
| Fig. 4.9 | Comparison of risk level by VTS center (Situation 3) | 130 |
| Fig. 4.10 | $CoRi$ associated with risk attitudes from 10mins before collision | 131 |
| Fig. 5.1 | Collision risk simulation screen for D & H | 144 |
| Fig. 5.2 | Value E_{ij} , T_{ij} and A_{ij} according to simulation time | 145 |
| Fig. 5.3 | Comparison of collision risk for $CoRi(\rho=-1)$ and $ES_s(H)$ | 146 |
| Fig. 5.4 | VTS screen of G & P | 148 |
| Fig. 5.5 | Collision risk simulation screen for G & P | 151 |
| Fig. 5.6 | Value E_{ij} , T_{ij} and A_{ij} according to simulation time | 152 |
| Fig. 5.7 | Comparison of collision risk for $CoRi(\rho=-1)$ and $ES_s(G)$ | 153 |
| Fig. 5.8 | VTS screen of M & C | 155 |
| Fig. 5.9 | Collision risk simulation screen for M & C | 158 |
| Fig. 5.6 | Value E_{ij} , T_{ij} and A_{ij} according to simulation time | 159 |
| Fig. 5.11 | Comparison of collision risk for $CoRi(\rho=-1)$ and $ES_s(M)$ | 160 |

The Development of the Ship Collision Risk Model from the VTSO' s Viewpoint

Lee, Jin Suk

Department of Navigation Science

The Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



Abstract

According to KMST(Korea Maritime Safety Tribunal)'s marine accidents statistics, 82.8% of the collision accidents occurred in the last 5 years(2010~2014) are caused by not observing the good seamanship, such as maintaining a proper look-out, checking the ship' s position and course regularly.

Especially, most of the collision accidents that occurred during this period in Korea are caused by OoW(Officers of Watch)s' human errors.

In order to decrease these dangers of marine accidents and secure the safety and efficiency of traffic for vessels, VTS(Vessel Traffic Service) has been established all the countries around the world. Fifteen(15) Port VTSs and three(3) Coastal VTSs are operational in Korea.

The VTSO (Vessel Traffic Service Operator) monitors the vessels through the VTS equipment and provides safety information to the ship to prevent collision between vessels.

When VTSO determine the degree of collision risk of two vessels, they consider comprehensive information about each vessel's course, speed, CPA(Closest Point of Approach), TCPA(Time to the Closest Point of Approach), and encounter situation, among many other considerations.

In this study, we propose a utility function based on risk attitudes of VTSO about the Risk Index(RI) which be calculated with the risk of encounter(E_{ij}), the risk of time(T_{ij}) and the risk of approach(A_{ij}) for two vessels to predict each ship's collision risks from the VTS viewpoint.

First, we proposed an algorithm in which two relative bearings as information about two vessel's encountering situation are used to evaluate the risk of encounter(E_{ij}). In order to verify whether or not the proposed algorithm is reasonable, we set up twenty encountering situations and conducted a survey of collision risk on VTSOs and OoWs on those situations. By comparing the degrees of collision risk with the proposed algorithm to the results of the survey, we found that relative bearing at CPA is very important factor for VTSO to recognize the level of collision risk when two vessels are in encountering situation.

And then, we surveyed the degree of risk of VTSO in the spare time for the ship with impending danger of collision by the questionnaire and calculated the risk of time(T_{ij}). Thereafter, we obtained the ship domain with minimum safe distance of the VTSO converted to the length

of the ship and calculated the risk of approach(A_{ij}) to move the domains of each vessel at the point of CPA.

Additionally, we confirmed that there is a difference in perception of risk according to individual VTSO even in the same vessel crossing situation. In order to reflect this, the Ship Collision Risk Model (*CoRi*) associated with different VTSO's risk attitudes on the value by calculating the RI was obtained by referring to the study which calculated the utility according to the risk attitude of the decision maker.

We obtained each coefficient of the RI and the risk attitude through the survey of collision risks among VTSOs of Korea. In order to verify whether the proposed utility is reasonable, we validated by applying the *CoRi* to some historical cases of accidents in Busan port along with the Ship of ES value(ES_s) of ES(Environmental Stress) model.

KEY WORDS : VTSO; Ship Collision Risk; VTS viewpoint; Risk Index; Risk attitude

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

해양안전심판원의 최근 5년(2010-2014)간 해양사고 통계를 보면, 425건의 충돌사고 중 약 82.8%(352건)가 경계·선위확인·침로유지 등 항해 일반원칙을 준수하지 않아 발생하고 있다. 특히, 이 기간에 발생한 충돌 사고 중 상대 선박을 발견하지 못하거나 처음 확인한 거리가 1~2마일 미만인 경우가 전체 충돌사고의 약 69.4%를 차지하고 있다(KMST, 2015).

이처럼 국내에서 발생하는 충돌사고 대부분이 경계 소홀로 상대 선박을 조기에 인지하지 못하거나 선박 운항자의 운항과실로 인하여 발생하고 있다.

이러한 충돌 사고 위험을 감소시키고 선박 통항의 안전과 효율성 증진을 위하여 국제해사기구(International Maritime Organization, 이하 IMO)에서는 각국의 주관청으로 하여금 해상교통이 야기할 수 있는 유해한 영향으로부터 연안해상설비와 해상작업위치, 근접해안지역, 해양환경의 보호, 항해의 효율성과 안전, 인명의 보호를 위해 필요한 지역에 해상교통관제(Vessel Traffic Service, 이하 VTS)를 설치·운영하도록 하고 있다(IMO, 1997).

VTS는 레이더, 선박자동식별장치(Automatic Identification System, 이하 AIS), 초단파 무선 통신 장비(Very High Frequency, 이하 VHF) 등 선박의 위치를 탐지하고 선박과 통신할 수 있는 설비를 이용하여 선박 교통의 안전과 효율성을 확보하고 해양환경 보호를 위하여 통항 선박의 동정을 관찰하고 항행 안전 정보를 제공하는 서비스를 말한다.

현재 우리나라는 국내 연안 해역의 해상교통 안전을 확보하기 위하여 15개의 항만과 3개의 연안에 VTS를 설치·운영하고 있고 점차 확대 운영할 계획이다.

해상교통관제사(VTS Operator, 이하 VTSO)는 선박의 충돌사고 예방과 원활한 선박 교통흐름을 위하여 VTS 시스템을 통해 선박의 움직임을 실시간으로 모니터링하고 충돌위험 상황을 인지하는 과업을 수행하며, 해당 선박이 적절한 조

치를 하여 사고를 예방할 수 있도록 관련법에 따라 정보제공·조언·권고·지시 등을 통한 관제업무를 수행하고 있다.

그러나 일부 선박에서는 근접 상황이 되어도 변침·감속 등 적절한 조치를 취하지 않거나, 유지선이 피항선의 의도를 파악하지 않은 채 근접 위험 상황에서 피항선 방향으로 좌현 변침하여 위험한 상황이 전개되거나 충돌사고로 이어지는 경우가 발생하고 있다.

이처럼 선박의 충돌사고 예방과 원활한 선박 교통흐름을 위하여 VTS 시스템을 통해 선박의 움직임을 실시간으로 모니터링하고 충돌 위험 상황을 인지하는 과업을 수행하는 VTSO의 역할은 선박 충돌 사고의 예방에 있어서 매우 중요하며, 선박 운항자의 인적요인으로부터 발생할 수 있는 위험을 보완하고 지원하는 매우 중요한 의미가 있다.

VTS의 효용성에 관한 연구는 해양사고를 분석하여 안전성을 제고한 연구(김영습, 2009), VTS 교신량 분석을 통한 효용성 증진에 관한 연구(박성우, 2012), VTSO의 최소안전거리에 관한 기초 연구(김종성, 2013), 그리고 선박 조우 상황에 대한 적정 관제 개입시기에 관한 기초 연구(박상원, 2015) 등이 있다.

선박 간 충돌 위험은 각 선박의 당직 항해사 관점에서 위험 여부를 판단하여 그에 따른 변침, 감속 등 적절한 조치를 취하는 것이 일반적이나, 국내에서 발생하는 충돌사고 대부분이 선박의 경계 소홀 등 선박 운항자의 운항과실로 발생하고 있어 이에 대한 대책 마련이 필요하다.

따라서 이러한 선박 운항자의 인적요인으로부터 발생할 수 있는 위험요소를 보완하고 관제구역을 통항하는 선박을 모니터링하며 선박 간에 발생할 수 있는 충돌 위험을 제삼자의 관점, 즉 VTSO 관점에서 사전에 예측하여 관련 정보를 해당 선박에 제공함으로써 안전한 통항을 유도하기 위한 평가모델 개발이 필요하다.

이에 본 논문에서는 선박의 충돌 위험을 VTSO 관점에서 예측하기 위한 평가모델을 개발하기 위하여 VTSO를 대상으로 설문을 실시하고 선박의 충돌 위험요소를 선박 조우 상황에 따른 위험(Risk of Encounter, E_{ij}), 선박 간 최단 접

근시간에 따른 위험(Risk of Time, T_{ij}), 그리고 선박 간 근접거리에 따른 위험(Risk of Approach, A_{ij})으로 나누어 위험지수(Risk Index, RI)를 구하고자 한다.

또한, 선박 교차 상황이 같다 하더라도 VTSO 개인에 따라 위험성을 판단하는데 차이가 있음을 확인하고, 이를 구분하기 위하여 특정한 의사결정의 결과가 불확실성 혹은 위험에 대처하는 개인의 태도에 따라 만족도가 달라지는 의사결정자의 위험 태도에 따른 효용성과 관련된 연구(Ang AH-S & Tang WH, 1984)에서 RI 에 대한 VTSO의 위험 태도에 따른 충돌 위험도 평가모델($CoRi$)을 개발하고자 한다.

$CoRi$ 는 양 선박의 충돌 위험이 임박한 상황에서 RI 에 대하여 충돌 위험도를 평균치보다 작게 판단하는 VTSO의 위험 태도는 위험 감수형, 같게 판단하는 VTSO는 위험 중립형, 그리고 크게 판단하는 VTSO는 위험 회피형으로 구분할 수 있다.

이를 통해 관제구역 내의 통항하는 선박 간 충돌 위험이 예상되는 상황에서 VTSO의 위험 정도 판단을 지원함으로써 국내 항만과 연안에서 발생할 수 있는 선박 충돌 사고 예방에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 연구 방법

VTSO 관점에서의 선박 충돌 위험도 평가모델을 개발하기 위한 연구 방법은 Fig. 1.1과 같다.

먼저 국내외 해상교통 평가모델의 실행 및 평가 방법을 조사하고, 기존 평가모델의 특징과 개선사항을 분석하였다.

그 결과, 선박 운항자의 인적요인으로부터 발생할 수 있는 위험을 보완하고 실시간으로 변화하는 선박 움직임에 따라 선박 간 충돌 위험 여부를 판단하기 위한 방안으로 국내 연안과 항만 대부분에 설치·운영되고 있는 VTS에서 선박 간 충돌 위험도를 평가하기 위한 모델 개발의 필요성과 연구 방법에 대하여 고찰하였다.

VTSO가 VTS 시스템을 통해 선박 정보를 모니터링하며 충돌 위험성을 판단하는 정도를 RI 라 정의하고, 충돌 위험 요소를 선박 조우 상황에 따른 위험지수(E_{ij}), 선박 간 최단 접근시간에 따른 위험지수(T_{ij}) 그리고 선박 간 근접거리에 따른 위험지수(A_{ij})로 분류하여 구하였다.

CPA에서의 상대방위에 따라 선박 조우 상황에 따른 위험지수, 즉 E_{ij} 가 VTSO 관점에서 조우 상황을 판단하기에 타당한지 여부를 확인하기 위하여 VTSO와 선박 운항자를 대상으로 설문조사를 하였다.

추가로 시행한 설문조사에서 양 선박이 충돌 위험까지 남아 있는 시간에 따라 VTSO가 느끼는 위험 정도와 AIS로 확인 가능한 선박 주요 정보가 여유 시간에 미치는 영향 정도를 조사하여 T_{ij} 를 구하였다.

또한 양 선박이 최대로 근접하여 통과하는 상황을 가정할 때 VTSO의 최소 안전거리를 선박 길이로 환산하여 선박을 중심으로 한 VTSO의 Safety domain을 구하고 이를 이용하여 A_{ij} 를 구하였다.

설문에서 같은 선박 교차 상황이라 하더라도 VTSO 개인에 따라 충돌 위험을 판단하는데 차이가 있었고, 이를 구분하기 위하여 위험 인식과 위험 태도와 관련된 국내외 연구 중 특정한 의사결정의 결과가 불확실성 혹은 위험에 대처하는 한 개인의 태도에 따라 만족도가 달라지는 의사결정자의 위험 태도에 따른 효용성과 관련된 연구를 참고하여 RI 에 대한 VTSO의 위험 태도를 분석하고 최종적으로 $CoRi$ 를 구하였다.

$CoRi$ 로 계산된 위험도가 적정한지를 검증하기 위하여 ES Model의 교통 환경 스트레스치(Ship of ES Value, ES_s)와 함께 부산항 관제구역에서 발생한 충돌 및 준사고 사례에 적용하여 시뮬레이션을 한 결과, $CoRi$ 가 ES_s 보다 선박의 변침·감속 등 회피동작에 따른 VTSO가 느끼는 당시 상황을 위험도로 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

끝으로 이 연구의 결과와 내용을 요약하고 이 연구가 내포하고 있는 시사점 및 연구의 한계를 서술하여 향후 연구 방향을 제시하였다.

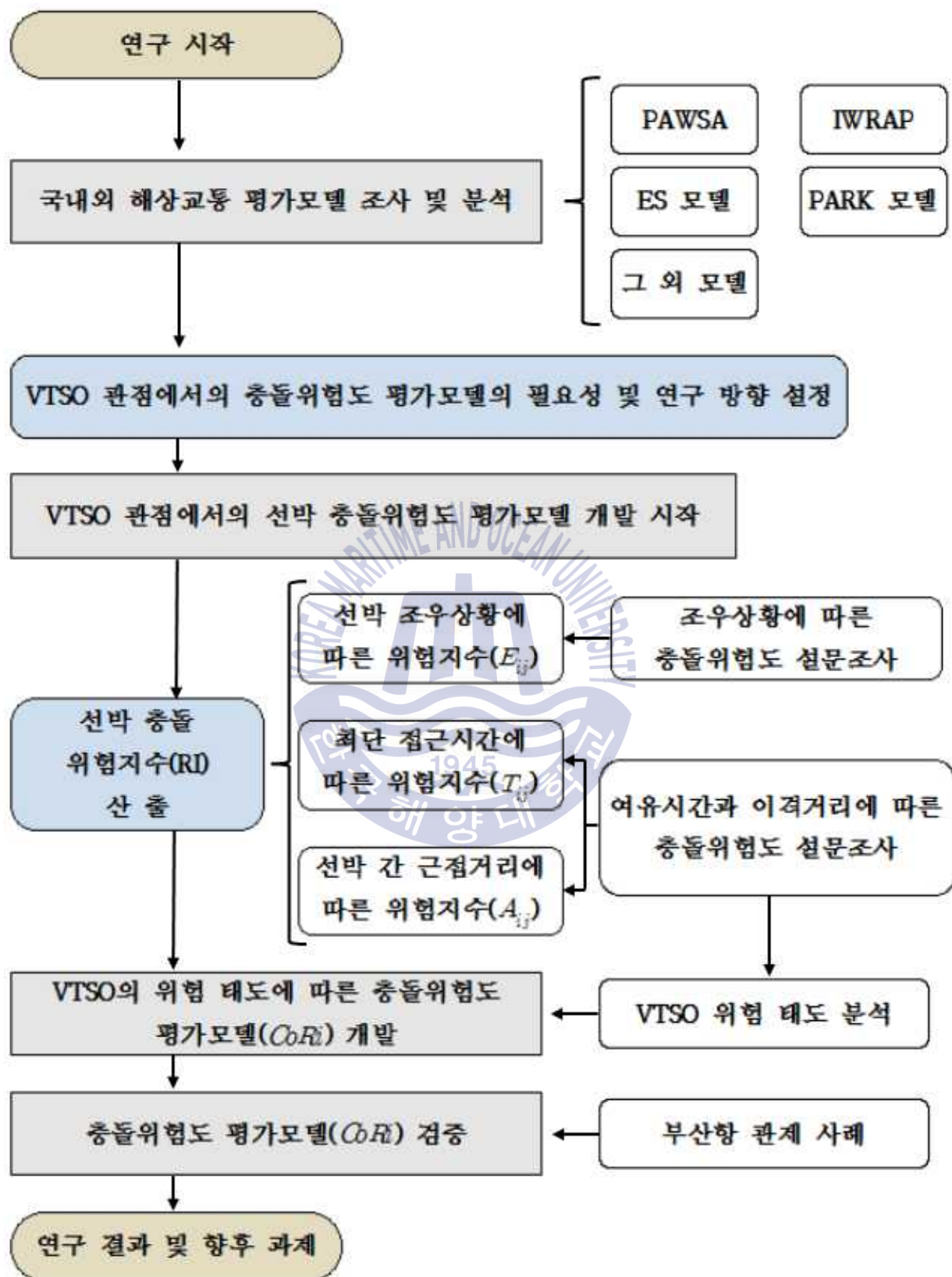


Fig. 1.1 Flow chart of study



제 2 장 국내외 해상교통 평가모델 조사 및 분석

이 장에서는 해상교통 평가모델로 널리 사용되고 있는 PAWSA(Port and Waterways Safety Assessment, 이하 PAWSA), IWRAP(IALA Waterway Risk Assessment Program, 이하 IWRAP), ES 모델(Environment Stress, 이하 ES 모델) 등이 실행되고 평가되는 절차와 그 결과에 대하여 살펴보고 각 모델의 특징과 장·단점에 대하여 분석하였다.

또한, 각 모델의 분석 결과를 기초로 본 논문에서 제안하는 VTSO 관점에서의 선박 충돌 위험도 모델의 필요성과 연구 방향에 대하여 고찰하였다.

2.1 PAWSA

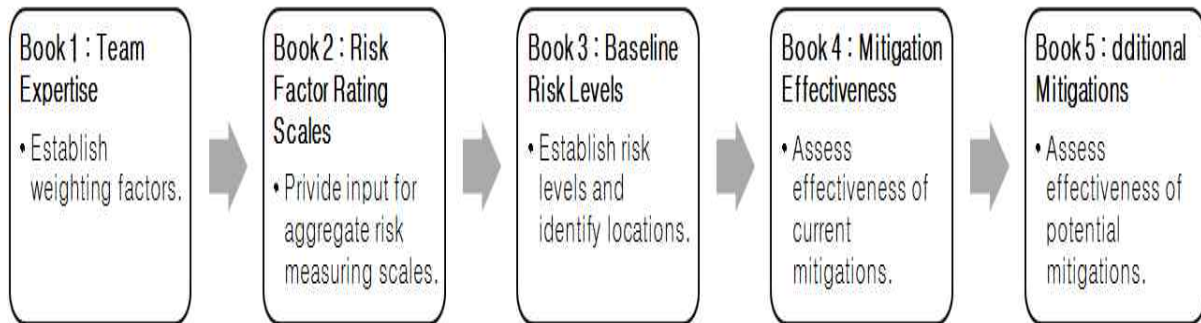
PAWSA는 미국의 주요 항만의 출입항로 및 정박지 등을 선박 운항에 장애가 없도록 설계·운영하기 위하여 해당 수역의 전문가 의견을 취합·분석하여 정성적인 결과를 얻는 교통 위험성 평가모델이다(USCG, 2012).

PAWSA는 1997년 미 의회에서 선박 관제센터 관리·운영에 관한 개선을 요구하면서 개발이 시작되었다. PAWSA의 장기적인 목표는 VTS의 설립 및 확장을 포함한 해상교통관리(Vessel Traffic Management, VTM)에 필요한 자료를 제공하고, 정부와 개인(결정에 영향을 받는 이해당사자 포함) 간의 이견 조율 및 협력을 강화하여 향상된 해상교통시스템(Maritime Transportation System, MTS)을 구축하는 데 있다.

또한, 각 항만 안전 위원회(Harbor Safety Committees, HSC)를 육성 개발하여 담당 구역 내 수로 관리와 해상교통관리에 있어서 항장(Coast Guard Captains of the Port, COTP)의 역할을 지원하고 강화하는 데 있다(USCG, 2009).

2.1.1 PAWSA 평가 절차

PAWSA 모델은 Fig. 2.1과 같이 5단계로 수행되며, PAWSA의 각 단계별 평가 절차 및 방법은 다음과 같다.



출처 : Ports and Waterways Safety Assessment Workshop Guide, Chapter 1

Fig. 2.1 The five main steps of PAWSA process

- o Book 1(전문가 그룹 구성) : 전문가 그룹을 구성하여 상, 중, 하로 구분하고, 각 그룹별로 전문성에 따라 가중치를 부여한다. 예를 들어 Navigation Condition에 대하여 A팀은 상, B팀은 하, C팀은 상으로 구성되면 전체 가중치는 $7(3+1+3)$ 이 된다. 따라서 Navigation Condition에 대한 각 팀별 의견 비중은 A팀 약43%(=3/7), B팀 약14%(=1/7) 그리고 C팀은 약43%(=3/7)가 되며 이 비중은 다음 모든 단계에서 각 팀의 가중치를 나타내는데 사용된다.
- o Book 2(위험 항목의 평가 척도) : 워크숍 참가자들은 Fig. 2.2와 같이 24가지의 위험항목에 대하여 정성적 기술을 통하여 위험 항목 평가 척도(Risk Factor Rating Scale)를 얻게 된다. 예를 들어 각 팀은 바람에 대하여 항목별로 1에서 9까지 레벨 중 하나를 택한 후, 이를 Book 1에서 정한 팀별 비중을 곱하여 바람에 대한 총 점수를 아래와 같이 산출한다.

| | Team 1 | Team 2 | Team 3 | Sum |
|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------|
| Frist Comparison | $4 \times 0.43 = 1.72$ | $3 \times 0.14 = 0.42$ | $3 \times 0.43 = 1.29$ | 3.43 |
| Second Comparison | $7 \times 0.43 = 3.01$ | $5 \times 0.14 = 0.70$ | $6 \times 0.43 = 2.58$ | 6.29 |
| Thrid Comparison | $7 \times 0.43 = 3.01$ | $8 \times 0.14 = 1.12$ | $8 \times 0.43 = 3.44$ | 7.57 |
| Grand Total : | | | | 17.29 |

1은 가장 양호한 값(Value A)이고 9는 가장 위험한 값(Value D)이 되며, 이 값의 차이는 8이 된다. 이를 이용하여 바람에 대한 각 값을 계산하면 $A=1.0$, $B=1.0+(3.43/17.29*8)=2.59$, $C=2.59+(6.29/17.29*8)=5.50$ 그리고 $D=5.50+(7.57/17.29*8)=9.0$ 이 된다. 이와 같이 24가지 위험 항목에 대해서 각

각 계산하여 위험도 값을 얻게 된다.

- o Book 3(위험 수준의 기준설정) : Book 2에서 발견된 위험 범위가 해당 항목에서 적용할 수 있는지 여부를 결정하기 위해 참가자들은 위험 수준의 기준을 설정하게 된다. 이 결과는 각 요소에 대한 위험레벨을 나타내는 것으로 항목에서 위험을 줄이기 위해 실행된 어떠한 조치에 대하여 평가하는 것은 아니다. 각 팀별로 Book 2에서 정해진 위험값(A~D)을 선택하고 Book 1에서 정한 팀별 점수를 곱하면 Wind condition factor는 5.1(반올림)이 된다.

| | <u>Team 1</u> | <u>Team 2</u> | <u>Team 3</u> | |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|------------|
| Box Checked | Third | Second | Third | |
| Spreadsheet Entry | 3 | 2 | 3 | |
| Risk Value | C | B | C | |
| Value Assigned | 5.50 | 2.59 | 5.50 | |
| | <u>Team 1</u> | <u>Team 2</u> | <u>Team 3</u> | <u>Sum</u> |
| Value Assigned | 5.50 | 2.59 | 5.50 | |
| Expertise Score | 0.43 | 0.14 | 0.43 | |
| Product | 2.36 | 0.36 | 2.36 | 5.08 |

- o Book 4(효과성 완화) : 두 가지의 목적으로 사용한다. 첫째는 모델에서 각 항목의 위험 수준을 완화하기 위한 전략의 효과를 평가하기 위해 사용하고 평가 결과는 현재 위험 수준에 반영한다. 둘째는 위험성 완화 전략이 충분한 균형을 이루고 있는지를 결정하며, 주어진 위험항목이 합의에 의해 현존하는 완화 방법을 대체하고자 한다면 해당 위험항목은 다음 단계로 넘어가 토론을 거치게 된다. 즉, 위험 수준 완화 전략이 효과가 있다면 ‘Yes’ , 없다면 ‘No’ 라고 대답하며 참가자의 2/3이상이 Yes라 하면 Book 5에서의 추가적인 의논 및 평가 대상에서 제외하고 Balanced(녹색)라 표시한다. 2/3이상이 No라 하면 No(빨강)라 표시하고, Yes 또는 No가 2/3 이하면 Maybe(노랑)로 표시하여 Book 5에서 추가적인 논의를 진행한다. 그리고 같은 항목에 대한 이전 PAWSA 평가보다 현재가 높게 나오면 Rising(빨강)으로 표시한다.
- o Book 5(추가적 완화 조치) : 특정 위험 경감 활동에 대해 아이디어를 제공하고, 향후 위험 수준의 경감 효과를 예측한다.

이 모델은 해양사고의 원인과 결과, 사고 가능성에 대하여 광범위한 평가를 실시하며 평가항목은 Fig. 2.2와 같이 6가지 주요 항목과 각 항목당 4가지 세부 요소에 대하여 평가한다.

| Waterway Risk Model | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Vessel Conditions | Traffic Conditions | Navigational Conditions | Waterway Conditions | Immediate Consequences | Subsequent Consequences |
| Deep Draft Vessel Quality | Volume of Commercial Traffic | Winds | Visibility Impediments | Personnel Injuries | Health and Safety |
| Shallow Draft Vessel Quality | Volume of Small Craft Traffic | Water Movement | Dimensions | Petroleum Discharge | Environmental |
| Commercial Fishing Vessel Quality | Traffic Mix | Visibility Restrictions | Bottom Type | Hazardous Materials Release | Aquatic Resources |
| Small Craft Quality | Congestion | Obstructions | Configuration | Mobility | Economic |

출처 : Port and Waterways Safety Assessment Workshop Report, 2009

Fig. 2.2 Risk factors in PAWSA

2.1.2 평가 결과

PAWSA를 이용하여 미국 텍사스 Houston 및 Galveston에 대하여 평가한 결과를 살펴보면, 19명의 전문가가 워크숍에 참가하여 그룹을 구성하여 Fig. 2.2와 같이 24가지 위험항목에 대하여 각 그룹별로 평가하여 Fig. 2.3와 같이 위험 평가 기준을 구한다.

설정된 기준 값에서 참가자들이 제안하는 완화 또는 중재 방안의 효과 여부를 평가하여 Fig. 2.4와 같은 결과를 얻는다.

| Baseline Risk Levels | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Vessel Conditions | Traffic Conditions | Navigational Conditions | Waterway Conditions | Immediate Consequences | Subsequent Consequences |
| Deep Draft Vessel Quality | Volume of Commercial Traffic | Winds | Visibility Impediments | Personnel Injuries | Health and Safety |
| 4.0 | 8.7 | 3.1 | 7.5 | 7.3 | 8.7 |
| Shallow Draft Vessel Quality | Volume of Small Craft Traffic | Water Movement | Dimensions | Petroleum Discharge | Environmental |
| 5.0 | 4.3 | 4.2 | 8.3 | 9.0 | 5.3 |
| Commercial Fishing Vessel Quality | Traffic Mix | Visibility Restrictions | Bottom Type | Hazardous Materials Release | Aquatic Resources |
| 8.4 | 7.0 | 3.4 | 2.7 | 8.7 | 6.9 |
| Small Craft Quality | Congestion | Obstructions | Configuration | Mobility | Economic |
| 4.6 | 6.9 | 5.0 | 8.4 | 8.5 | 9.0 |

출처 : Port and Waterways Safety Assessment Workshop Report, 2009

Fig. 2.3 Baseline Risk Levels in PAWSA

| Mitigation Effectiveness | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----|-------------------------------|-----|-------------------------|-----|------------------------|-----|-----------------------------|-----|-------------------------|-----|
| Vessel Conditions | | Traffic Conditions | | Navigational Conditions | | Waterway Conditions | | Immediate Consequences | | Subsequent Consequences | |
| Deep Draft Vessel Quality | | Volume of Commercial Traffic | | Winds | | Visibility Impediments | | Personnel Injuries | | Health and Safety | |
| 4.0 | 2.6 | 8.7 | 4.6 | 3.1 | 2.1 | 7.5 | 5.0 | 7.3 | 4.6 | 8.7 | 5.6 |
| Balanced | | Balanced | | Balanced | | NO | | Balanced | | Balanced | |
| Shallow Draft Vessel Quality | | Volume of Small Craft Traffic | | Water Movement | | Dimensions | | Petroleum Discharge | | Environmental | |
| 5.0 | 3.2 | 4.3 | 2.9 | 4.2 | 3.1 | 8.3 | 5.6 | 9.0 | 5.4 | 5.3 | 3.3 |
| Maybe | | Balanced | | Balanced | | Balanced | | Balanced | | Balanced | |
| Commercial Fishing Vessel Quality | | Traffic Mix | | Visibility Restrictions | | Bottom Type | | Hazardous Materials Release | | Aquatic Resources | |
| 8.4 | 6.7 | 7.0 | 5.1 | 3.4 | 2.4 | 2.7 | 1.9 | 8.7 | 5.6 | 6.9 | 3.8 |
| NO | | Maybe | | Balanced | | Balanced | | Balanced | | Balanced | |
| Small Craft Quality | | Congestion | | Obstructions | | Configuration | | Mobility | | Economic | |
| 4.6 | 2.9 | 6.9 | 4.9 | 5.0 | 2.7 | 8.4 | 5.6 | 8.5 | 5.8 | 9.0 | 6.4 |
| Balanced | | Maybe | | Balanced | | Maybe | | Maybe | | NO | |

출처 : Port and Waterways Safety Assessment Workshop Report, 2009

Fig. 2.4 Mitigation Effectiveness in PAWSA

| Additional Interventions | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Vessel Conditions | Traffic Conditions | Navigational Conditions | Waterway Conditions | Immediate Consequences | Subsequent Consequences |
| Deep Draft Vessel Quality | Volume of Commercial Traffic | Winds | Visibility Impediments | Personnel Injuries | Health and Safety |
| Balanced | Balanced | Balanced | Waterway Changes 4.7 | Balanced | Balanced |
| Shallow Draft Vessel Quality | Volume of Small Craft Traffic | Water Movement | Dimensions | Petroleum Discharge | Environmental |
| Coordination / Planning 2.9 | Balanced | Balanced | Balanced | Balanced | Balanced |
| Commercial Fishing Vessel Quality | Traffic Mix | Visibility Restrictions | Bottom Type | Hazardous Materials Release | Aquatic Resources |
| Enforcement 6.5 | Voluntary Training 4.7 | Balanced | Balanced | Balanced | Balanced |
| Small Craft Quality | Congestion | Obstructions | Configuration | Mobility | Economic |
| Balanced | Coordination / Planning 4.4 | Balanced | Coordination / Planning 4.2 | Coordination / Planning 2.7 | Coordination / Planning 3.2 Caution |

출처 : Port and Waterways Safety Assessment Workshop Report, 2009

Fig. 2.5 Additional Interventions in PAWSA

Table 2.1 Specific Actions in PAWSA

| Risk Factor | Strategy | Specific Actions |
|-----------------------------------|------------------------|---|
| Economic | Coordination /Planning | Allow flexibility for private industry to resolve the reduced functionality required for their purposes and economic survival. |
| Mobility | Coordination /Planning | Develop plan to address a completely blocked channel - Cooperative Business Continuity Plan; workflow and responsibilities required for contingencies such as Army Corps dredging a new channel or other alternatives to reopen the channel. |
| Active Traffic Management | Coordination /Planning | Expand the VTS Area to include existing fleeting area near the San Jacinto and Old River north to the I-10 Highway Bridge, Offshore Galveston Approach, Intracoastal Waterway from MM338 to Red Can Bend MM359 . Mitigate all crossings in the 'Y' and elsewhere. |
| Congestion | Coordination /Planning | Develop a "Common Passage Plan for the Houston-Galveston Ports and Waterways." |
| Traffic Mix | Voluntary Training | Awareness training regarding how vessels interact and need to work with each other. |
| Visibility Impediments | Waterway Change | Improve the navigational lighting; add more super ranges; ensure illumination of selected day boards. |
| Shallow Draft Vessel Quality | Coordination /Planning | Improve awareness of the charterers that will be using the charter vessel (Wire boats / non-rigid composite tug and tow) category so they fully understand the vessel limitations and impacts on other port users. |
| Commercial Fishing Vessel Quality | Enforcement | Additional resources to assist communicating and enforcing regulatory compliance. |

Fig. 2.4에서 빨강 및 노랑으로 표시된 8가지 위험 항목에 대하여 참가자들은 위험 완화 방법을 논의하고 적용하여 Fig. 2.5와 같은 결과를 얻는다.

마지막으로 추가적인 위험성 완화 조치가 필요한 요소는 Table 2.1과 같이 각 항목별로 대안을 구체적으로 언급한다.

이상에서 살펴본 바와 같이 PAWSA는 VTS 설치·운영과 관련된 기준을 정할 뿐 아니라 해당 수로 및 항만과 관련된 구성원들에게 지역 환경에 맞는 장기적인 위험 해결 방안과 위험도 평가를 제공한다.

PAWSA는 선박 운항자를 비롯하여 도선사, 항만관계자, 관련 정부 기관 등 전문가 및 지역 이해관계자로 구성된 그룹이 워크숍에 참가하여 해당 해역의 위험지수를 발견하고 의견을 교환함으로써 완화 조치와 대안을 도출하는 정성적인 평가모델로 참가자의 이해관계에 따라 위험지수의 평가 결과가 다를 수 있다.

하지만 해당 수역 및 항만의 위험지수항목을 24가지로 세분화한 점과 전문가로 구성된 각 그룹의 의견을 통계적으로 처리하여 문제 해결의 합의점을 도출하는 과정은 장점이라 할 수 있다.

2.2 IWRAP

IWRAP는 항로의 위험지수를 수치화하여 연간 충돌 및 좌초 확률을 예측하는 모델로서 IALA(International Association of Lighthouse Authorities, 이하 IALA)에서 추천하는 해상안전성 평가모델 중 정량적인 모델이다.

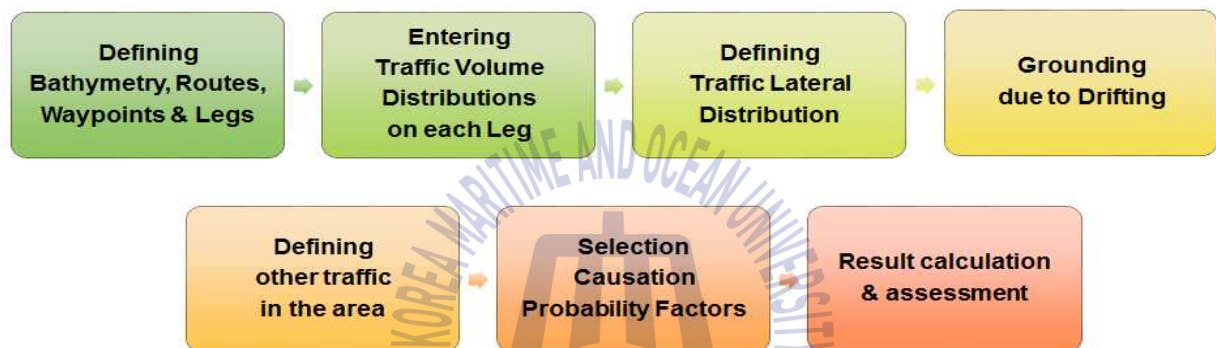
주요 입력 요소는 선박 교통량 및 통항로 항적 분산 등 선박 교통조건과 수심, 항로폭 등 항로조건이 있으며, 이러한 기초 자료를 입력하여 연간 충돌 및 좌초 발생 확률을 나타냄과 동시에, 프로그램에서 제공하는 지도상에 위험 정도를 색상별로 표시해준다(김대원, 2011).

IWRAP은 1974년 Fujii와 MacDuff의 연구와 캐나다의 MSD(Minimum Safe Design) 연구를 기초로 좌초와 충돌 확률을 예측하기 위해 개발한 평가모델이

다. 개발 초기에는 만족한 결과를 얻었지만, 이후 테스트 과정에서 충돌·좌초 확률이 비현실적으로 높게 나와 이를 보완하기 위해 IALA에서는 2007년 덴마크 해사국(DAMSA) 주도하에 IWRAP MK II 라는 새로운 모델을 개발하여 2009년 말라카 해협을 평가하였다(IALA, 2009).

2.2.1 IWRAP 평가 절차

IWRAP은 MS-Windows 기반으로 만들어진 프로그램으로 Fig. 2.6과 같은 절차로 실행된다.



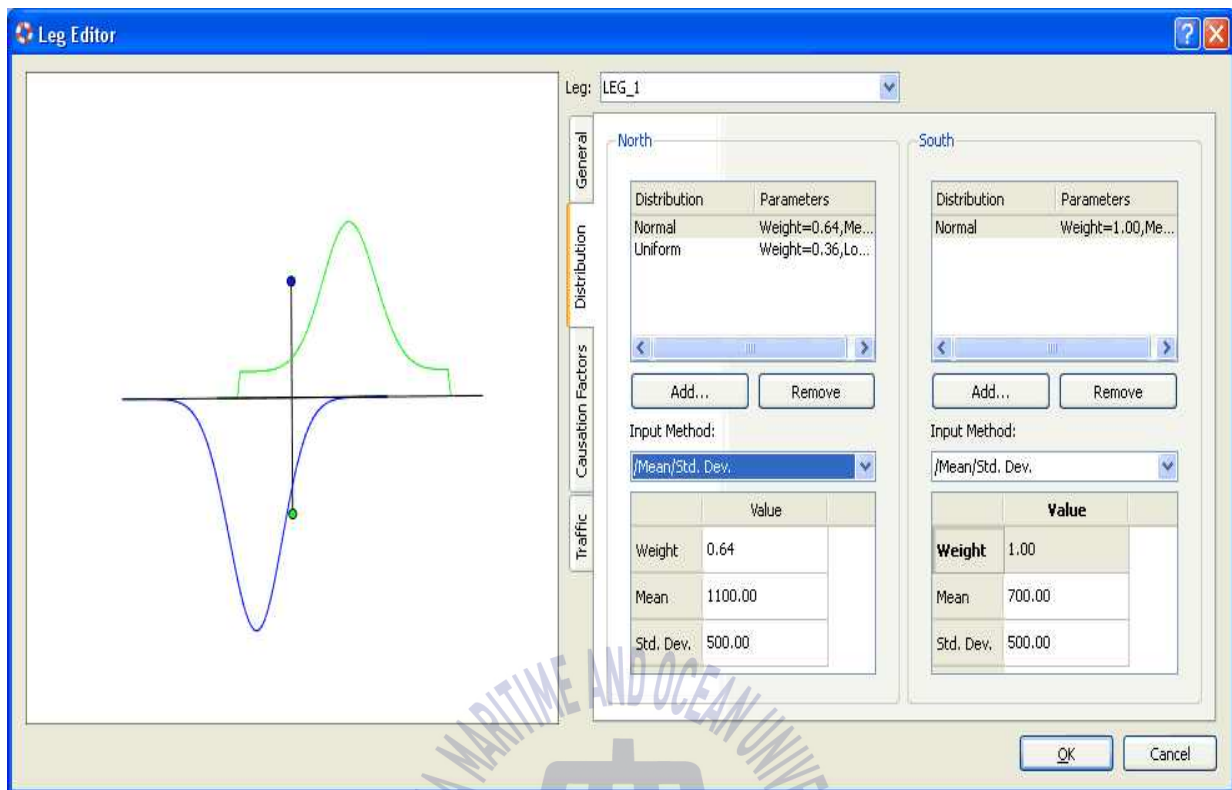
출처 : IALA Recommendation O-134, 2009

Fig. 2.6 IWRAP process

첫 단계에서는 항로와 관련된 가능한 많은 지리적 정보를 수집하여 수심, 변침점 등을 입력한다. 다음 단계에서는 Leg별 연간 선박 교통량을 선종별, 길이별로 구분하여 입력하고, Fig. 2.7과 같이 Route Leg editor에서 분산과 표준편차를 입력하여 Leg별 통항분포를 구한다.

대부분의 선박 교통량과 분포는 AIS정보를 통해 수집하지만 AIS를 설치하지 않은 어선 및 레저보트 등 기타 선박의 정보는 해당 수역의 연간 통항 밀도를 추측하여 입력한다.

다음으로 Leg별 충돌·좌초 확률 계산을 위한 Causation Factor는 Table. 2.2와 같이 기본 값으로 설정되어 있고 평가 대상 해역에 따라 값을 변경할 수 있다. 이 값은 선박의 충돌과 좌초를 회피하기 위한 동작이 실패할 확률과 같다.



출처 : IALA Recommendation O-134, 2009

Fig. 2.7 Route Leg editor(Lateral Distribution)

Table 2.2 Default Causation Probability Factors in IWRAP

| Condition | Causation Factor |
|-----------------------------------|------------------|
| Head on collisions | $0.5 * 10^{-4}$ |
| Overtaking collisions | $1.1 * 10^{-4}$ |
| Crossing collisions | $1.3 * 10^{-4}$ |
| Collisions in a bend situation | $1.3 * 10^{-4}$ |
| Collisions in a merging situation | $1.3 * 10^{-4}$ |
| Grounding - forgot to turn | $1.6 * 10^{-4}$ |

마지막으로 입력한 정보를 기초로 연간 충돌 및 좌초 확률을 계산하여 충돌·좌초 사고가 발생하는 위치와 상황을 표시하게 된다.

또한 평가자는 초기 결과에 대하여 항로상에 몇 가지 의도한 변화를 주어 결과를 조정할 수 있으며 몇 가지 시나리오를 가지고 민감도 분석 및 추가적인 위험 감소 방안에 대하여 평가 할 수 있다.

2.2.2 기하학적 충돌확률 계산 방법

IWRAP의 충돌 확률 공식은 Fujii(1974)과 MacDuff(1974)에 의해 정의된 접근 방식에 기반을 두며 식(2.1)와 같다.

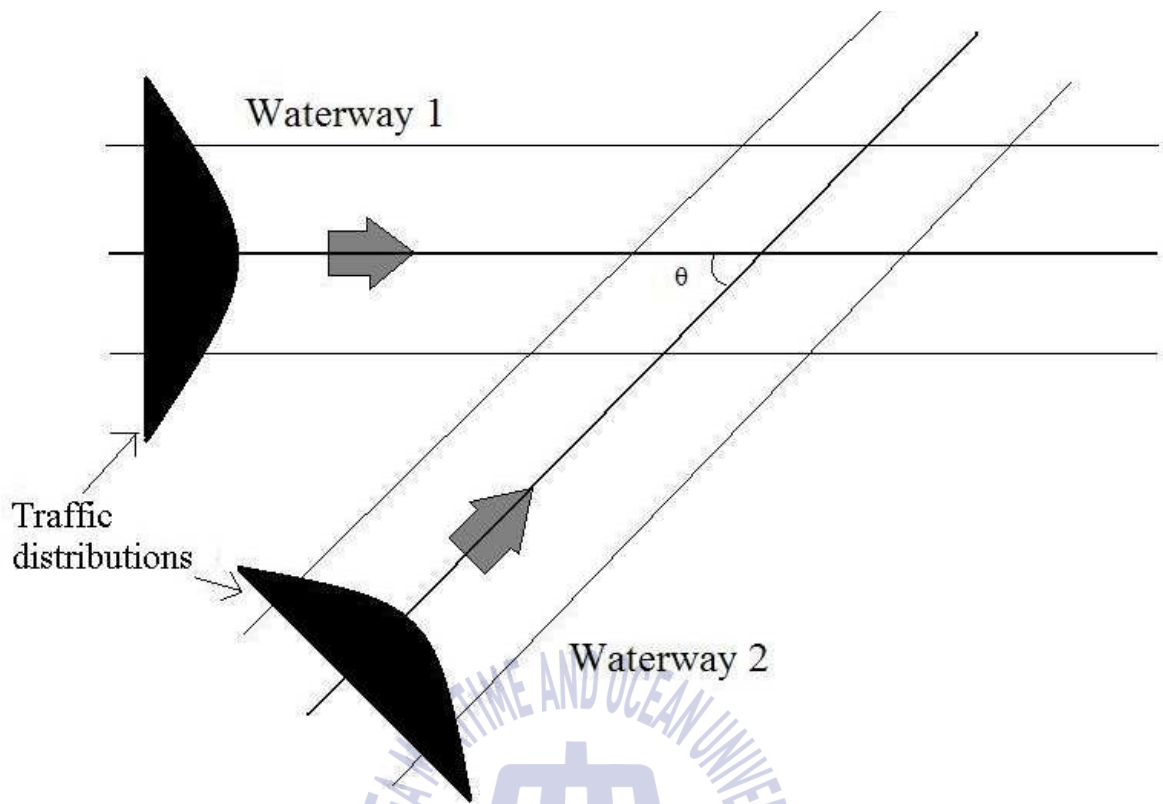
$$P = N_G \times P_C \quad (2.1)$$

N_G (The number of accident candidates)는 선박의 기하학적 분포에 기초한 확률로 MacDuff에 의해 연구되었고 선박의 교차 상태에 따른 계산식은 다음 각 절에서 기술하였다. 이 확률은 실제 관측된 충돌·좌초사고 수와 비교할 때 많은 사고를 예측함을 알 수 있다.

P_C (The causation factor)는 충돌 또는 좌초에 이르는 침로에서 회피 동작을 실패할 확률을 의미하며, 잠재적인 위험상황에서 회피 동작을 행하는 당직항해사의 능력과 선박의 모델을 기반으로 한다.

2.2.2.1 Crossing 상태에서의 충돌확률

Crossing 상태에서의 기하학적인 충돌 확률은 항로 (1)에서 i 선박이 항로 (2)에서 j 선박과 Fig. 2.8과 같이 조우각 θ 로 횡단할 경우 식(2.2)에 의해 결정된다(Friis Hansen, 2008).



출처 : Modelling Marine Accident Frequency Jutta Ylitalo, 2010

Fig. 2.8 Crossing waterways with traffic distributions

$$N_G^{crossing} = \sum_{i-j} \frac{Q_i^{(1)} Q_j^{(2)}}{V_i^{(1)} V_j^{(2)}} D_{ij} V_{ij} \frac{1}{\sin \theta} \quad (2.2)$$

$Q_i^{(1)}$: 항로(1)에서 i 선종의 선박 통항량

$Q_j^{(2)}$: 항로(2)에서 j 선종의 선박 통항량

$V_i^{(1)}$: 항로(1)에서 i 선박의 속력

$V_j^{(2)}$: 항로(2)에서 j 선박의 속력

$V_{ij} = \sqrt{(V_i^{(1)})^2 + (V_j^{(2)})^2 - 2 V_i^{(1)} V_j^{(2)} \cos \theta}$

D_{ij} : 선박의 기하학적인 충돌 반경(m)

θ : 조우각 ($\theta \neq 0, 10 \leq \theta \leq 170$)

여기서, D_{ij} 는 식(2.3)과 같다(Pedersen, 1995).

$$D_{ij} = \frac{L_i^{(1)} V_j^{(2)} + L_j^{(2)} V_i^{(1)}}{V_{ij}} \sin \theta + B_j^{(2)} \left\{ 1 - \left(\sin \theta \frac{V_i^{(1)}}{V_{ij}} \right)^2 \right\}^{1/2} + B_i^{(1)} \left\{ 1 - \left(\sin \theta \frac{V_j^{(2)}}{V_{ij}} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (2.3)$$

$L_i^{(1)}$: 항로(1)에서의 i 선박 길이(m)

$L_j^{(2)}$: 항로(2)에서의 j 선박 길이(m)

$B_i^{(1)}$: 항로(1)에서의 i 선박 선평(m)

$B_j^{(2)}$: 항로(2)에서의 j 선박 선평(m)

2.2.2.2 Head-on 및 Overtaking 상태에서의 충돌확률

Head-on 및 Overtaking 상태에서의 기하학적 충돌확률은 서로 마주보며 항해하는 상황을 나타낸 것으로 N_G 는 다음 식(2.4)와 식(2.5)에 의해 산출된다(Friis Hansen, 2008).

$$N_G^{head-on} = L_W \sum_{i-j} P_{Gi,j}^{head-on} \frac{V_{ij}}{V_i^{(1)} V_j^{(2)}} (Q_i^{(1)} Q_j^{(2)}) \quad (2.4)$$

$$N_G^{o-taking} = L_W \sum_{i-j} P_{Gi,j}^{o-taking} \frac{V_{ij}}{V_i^{(1)} V_j^{(2)}} (Q_i^{(1)} Q_j^{(2)}) \quad (2.5)$$

L_W : 항로 길이(m)

$P_{Gi,j}^{head-on}$: Head-on 상태에서 i, j 두 선박의 충돌확률

$P_{Gi,j}^{o-taking}$: Overtaking 상태에서 i, j 두 선박의 충돌확률

여기서, $P_{Gi,j}$ 는 항로를 통항하는 선박의 교통 분포에 의해서 결정되며 선박이 충돌을 피하기 위하여 대각 변침 등 급격한 선박 조종의 변화를 배제하고 있다. 두 선박이 좌표 $(u_i^{(1)}, \sigma_i^{(1)})$ 와 $(u_j^{(1)}, \sigma_j^{(1)})$ 에 분포할 경우, Head-on 상태에서의 기하학적 충돌 확률은 식(2.6)과 같고, Overtaking 상태에서 기하학적 충돌 확률은 식(2.7)과 같다(Friis Hansen, 2008).

$$P_{Gi,j}^{head-on} = \Phi\left(\frac{B_{ij} - u}{\sigma_{ij}}\right) - \Phi\left(-\frac{B_{ij} + u}{\sigma_{ij}}\right) \quad (2.6)$$

Φ : 표준정규분포 함수

$$B_{ij} = \frac{B_i^{(1)} + B_j^{(2)}}{2} : i \text{ 선박과 } j \text{ 선박의 평균 선평(m)}$$

$$\sigma_{ij} = \sqrt{(\sigma_i^{(1)})^2 + (\sigma_j^{(1)})^2}$$

$$u = u_i^{(1)} + u_j^{(2)} \text{ (양 선박의 Heading이 반대일 경우)}$$

$$P_{Gi,j}^{o-taking} = P\left[y_i^{(1)} - y_j^{(1)} < \frac{B_i^{(1)} + B_j^{(1)}}{2}\right] - P\left[y_i^{(1)} - y_j^{(2)} < -\frac{B_i^{(1)} + B_j^{(1)}}{2}\right] \quad (2.7)$$

$$y_i^{(1)} : \text{항로(1)의 중심선에서 } i \text{ 선박까지의 거리(m)}$$

$$y_j^{(2)} : \text{항로(2)의 중심선에서 } j \text{ 선박까지의 거리(m)}$$

2.2.3 평가 결과

IWRAP을 이용한 해상교통 안전성 평가 결과 중 국내에서는 울산항과 완도해역에서 실시되었으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

울산항은 초대형 유조선과 케미컬 운반선, 인근 조선소를 출입하는 예부선 및 작업선이 빈번하게 교차하는 항만으로 울산 본항, 장생포항, 온산항, 미포항, 방어진으로 구성되어 있다. 울산 본항을 입출항하는 선박은 제1, 2 항로를 이용

하며 온산항을 이용하는 선박은 제1, 3 항로를 이용한다(김대원, 2011).

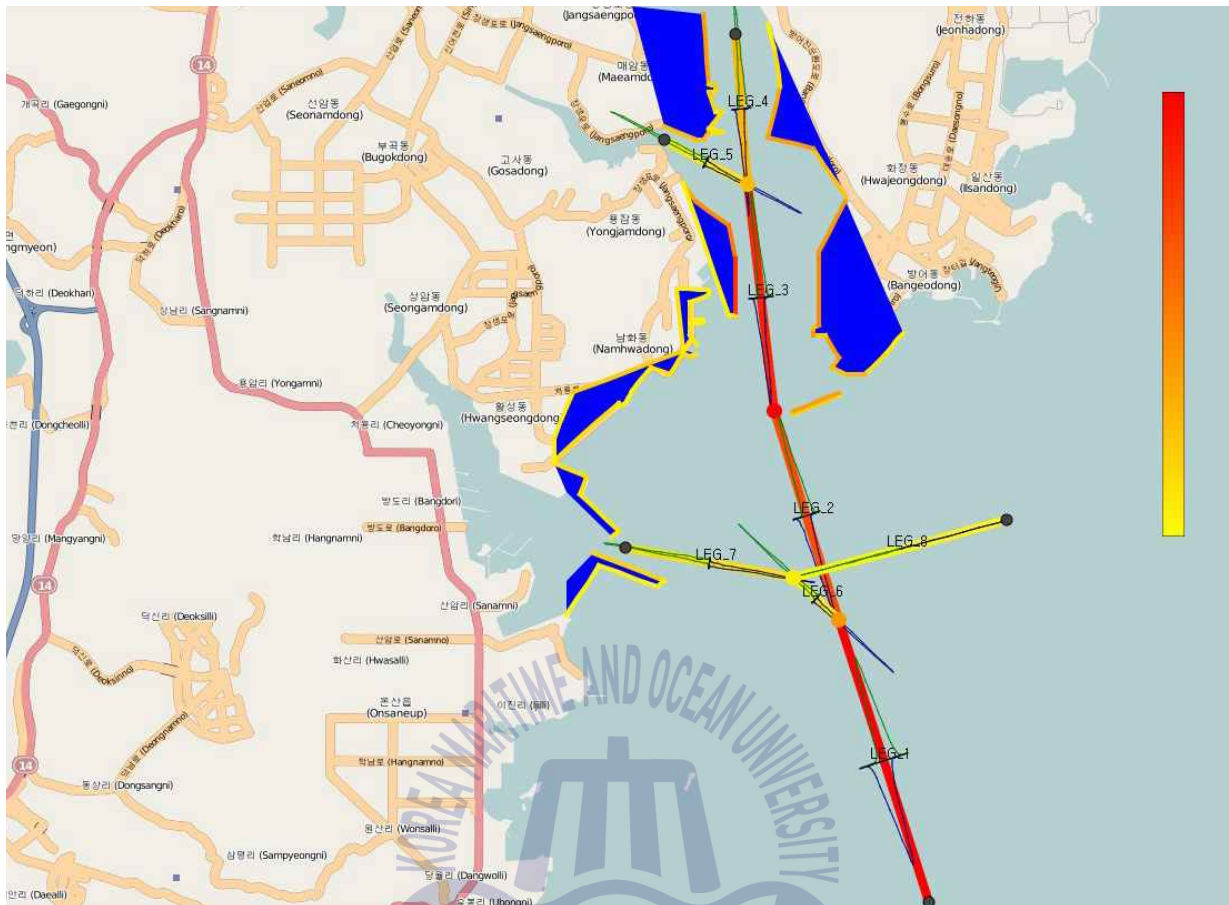
완도해역의 특성은 다도해 지역을 항해하는 여객선과 중소형 연안 화물선 및 예부선이 대상해역을 통과하여 항행하고 있다. 이 해역은 항로 중앙에 부이가 설치되어 우측항행을 하는 통항 분리항로(TSS)가 시행 중이다. 또한, 주변에 많은 섬으로 인해 항로가 협소하며, 강조류의 영향이 크다. 특히 완도항 입구 부근 교차해역은 남북 통항류와 동서 통항류가 교차하는 지역으로 해양사고가 빈번한 구역이다(김광일, 2012).

Leg 별 항로를 지정하고 선박 통항 정보와 항적 분포를 입력하여 Fig. 2.9와 같이 각 Leg 별 결과가 도출되었다. Table. 2.3은 울산항과 완도해역의 평가 결과이며, 울산항은 연간 좌초 확률 2.21건, 연간 충돌 확률 0.68건, 완도해역은 연간 좌초 확률 0.71건, 연간 충돌 확률 2.79건이다.

IWRAP으로 좀 더 정확한 결과를 산출하기 위해서는 평가하고자 하는 항만 및 해역 특성에 맞는 Causation Factor를 적용하여야 하나 두 해역 모두 IALA의 기본값(Table 2.2)을 적용하여 평가하였다.

Table 2.3 The number of collision and grounding

| Case | ULSAN | WANDO | Unit |
|-------------------------|-------------|-------------|------------------|
| Overtaking | 0.19 | 1.2 | Incidents / Year |
| Head On | 0.26 | 0.5 | |
| Crossing | 0.04 | 1.3 | |
| Total Collisions | 0.68 | 2.79 | |
| Total Grounding | 2.21 | 0.71 | |



출처 : 해상교통안전성 평가모델 개발을 위한 기초 연구, 2011



출처 : IWRAP에 의한 완도해역 충돌확률 분석, 2012

Fig. 2.9 The evaluation results of ULSAN(up) and WANDO(down) through IWRAP

이상에서 살펴본 바와 같이 IWRAP는 위험지수를 수치화하여 해당 수로의 연간 충돌 및 좌초 확률을 예측하는 모델로서 IALA 해상안전성 평가모델 중 정량적인 평가모델이다. 평가 수역 및 항만의 해도 또는 기타 수집된 정보를 입력하고, 그곳을 통항하는 선박의 AIS 데이터를 입력하여 선박의 충돌 및 좌초 확률을 계산한다.

확률 산출 방식은 선박이 피항 동작을 실패하여 선박 간 충돌 및 좌초할 확률을 계산하는 Fujii(1974)와 MacDuff(1974)에 의해 연구된 확률 공식을 기초로 선박 간 조우 관계에 따라 마주침(Head-on), 추월(Overtaking) 그리고 교차(Crossing) 상태에 대하여 계산한다.

그러나 선박이 충돌을 피하기 위한 대각도 변침 등 급격한 선박 조종의 변화를 배제하고 있고(Friis Hansen 2008), 선박 통항 항적이 복잡할 경우 평가에 어려움이 있다(김대원, 2011).

또한, 좀 더 정확한 결과 산출을 위하여 해당 항만 및 해역의 특성에 맞는 Causation Factor를 적용할 필요가 있으나 대부분 평가에서 IWRAP에서 기본으로 설정된 값을 사용하고 있다.

2.3 ES 모델

ES모델은 본선을 둘러싸고 있는 주변 환경을 조선 환경과 교통 환경으로 구분하고, 이 두 환경이 선박 운항자에게 가해지는 부하의 정도를 정량적으로 평가하기 위해 개발된 모델이다. 이 모델은 조선 환경과 교통 환경이 선박 운항자의 행동을 제약할 때 선박 운항자에게 가해지는 부하의 크기를 행동 제약에 따른 조선 곤란감에 기초하여 정량화한 것이다(INOUE, 2000).

ES값은 지형이나 시설물 등 조선 환경에 기인하는 스트레스의 크기인 [조선 환경 스트레스치(Land of ES value, ES_L)]와 타 선박에 기인하는 스트레스의 크기인 [교통 환경 스트레스치(Ship of ES value, ES_S)]로 구성되며, 두 스트레스치를 종합하여 [종합 환경 스트레스치(Aggregation of ES value, ES_A)]라 한다(INOUE, 2000).

종합 환경 스트레스치는 선박 운항자 기준 $\pm 90^\circ$ 에 해당하는 영역을 대상으로 그에 따른 위험 정도를 수치화한 것으로 개념은 Fig. 2.10과 같다.

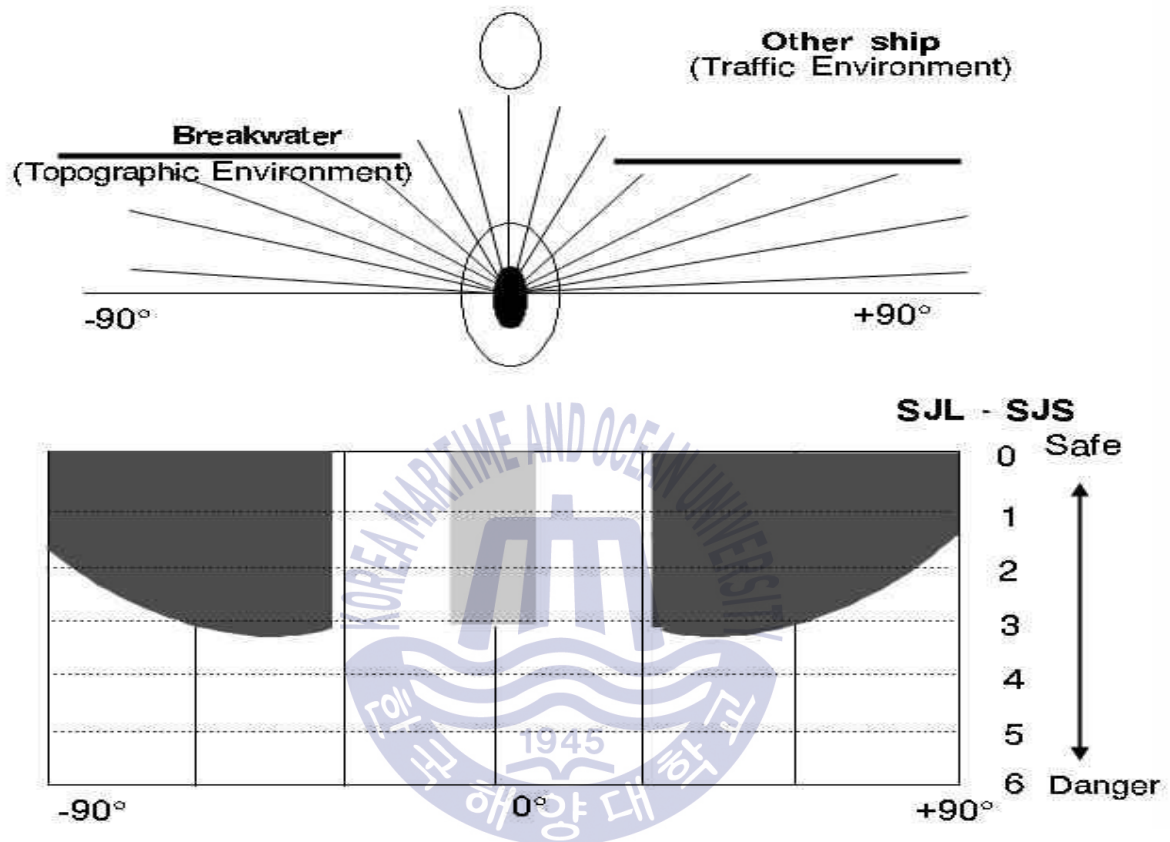


Fig. 2.10 Schematic figure of Aggregation of ES value(박진수 등, 2001)

2.3.1 환경 스트레스치 계산 방법

조선 환경 스트레스치와 교통 환경 스트레스치의 계산 순서는 다음과 같다 (INOUE, 2000).

- 자선의 원침로를 중심으로 $\pm 90^\circ$ 이내의 침로 범위에 대하여 고려한다.
- 각 침로별로 자선과 장애물과의 거리(R), 자선 속도(V)등에 의해 충돌 혹은 좌초 등의 위험이 가시화 될 때까지 시간여유(Time to collision, 이하 TTC)를 산출한다.

- 각 침로별로 TTC를 선박 운항자가 느끼는 위험감으로 변환한다.
- 원침로를 중심으로 좌우 $\pm 90^\circ$ 의 침로 범위에서 위험감을 총계하고, 그 순간의 스트레스치를 구한다.

선박 조종 시뮬레이션(31가지 항목)과 설문조사(573가지 항목)를 통하여 회귀 곡선을 치환하면 식(2.8)과 같다(INOUE, 2000).

$$SJ_L, SJ_S = \alpha \cdot TTC + \beta = \alpha \times (R/V) + \beta \quad (2.8)$$

SJ_L : TTC에 따라 조선 환경에 대하여 선박 운항자가 느끼는 위험감

SJ_S : TTC에 따라 교통 환경에 대하여 선박 운항자가 느끼는 위험감

TTC : 시간여유, R : 장애물까지의 거리, V : 자선의 속력

α, β : 자선의 선박 크기에 의해 결정되는 계수(SJ_L 인 경우)

자선과 타선의 선박 크기에 의해 결정되는 계수(SJ_S 인 경우)

침로에 대하여 좌우 $\pm 90^\circ$ 이내에서 각 침로별 선박 운항자가 느끼는 위험도의 합이 환경 스트레스 값이며, 조선 환경 스트레스치는 식(2.9), 교통 환경 스트레스치는 식(2.10)이 된다(INOUE, 2000).

$$ES_L = \sum (SJ_L)_i \quad (2.9)$$

$$ES_S = \sum (SJ_S)_i \quad (2.10)$$

여기서, $i = -90^\circ \sim +90^\circ$ 이다.

| SJ: MARINERS' JUDGEMENT | | ES value $\Sigma [SJ]_i$ | STRESS RANKING | | ACCEPTANCE CRITERIA |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------|--------------|---------------------|
| 0 | Extremely safe | 【 0 】 | NEGLECTIBLE | ACCEPTABLE | |
| 1 | Fairly safe | | | | |
| 2 | Somewhat safe | | | | |
| 3 | Neither safe or dangerous | 【 5 0 0 】 | MARGINAL | UNACCEPTABLE | |
| 4 | Somewhat dangerous | 【 7 5 0 】 | CRITICAL | | |
| 5 | Fairly dangerous | 【 9 0 0 】 | CATASTROPHIC | | |
| 6 | Extremely dangerous | 【 1 0 0 0 】 | | | |

Fig. 2.11 Stress Ranking and Acceptance Criteria(INOUE, 2000)

SJ 값은 선박 운항자가 느끼는 주관적 위험도를 0~6으로 나타내는데, 0인 경우는 위험 가시화까지 시간적 여유가 충분한 경우를 말하며, 6인 경우는 바로 위험이 가시화된 경우를 말한다. 좌우 $\pm 90^\circ$ 범위 내에서 장애물이 존재하지 않는 경우는 환경 스트레스치의 총합이 $0(0 \times 180 = 0)$ 이 되고, 좌우 $\pm 90^\circ$ 범위 내에서 모든 방향에 걸쳐 위험이 가시화하는 경우에는 환경 스트레스치의 총합이 약 1000($6 \times 180 \approx 1000$)이 된다.

Fig. 2.11에서 대단히 안전을 느끼는 상태에서 안전과 위험의 어느 쪽도 아니라고 느끼는 상태까지의 범위(스트레스치가 0~500의 범위)를 Negligible, 안전과 위험의 어느 쪽도 아니라고 느끼는 상태와 조금 위험을 느끼는 상태까지의 범위(스트레스치가 500~750의 범위)를 Marginal, 조금 위험을 느끼는 상태와 위험을 느끼는 상태까지의 범위(스트레스치가 750~900의 범위)를 Critical, 위험을 느끼는 상태와 대단히 위험을 느끼는 상태까지의 범위(스트레스치가 900~1000의 범위)를 Catastrophic이라 분류한다.

조선 환경 스트레스치와 교통 환경 스트레스치를 동시에 평가하는 경우에는 다음을 기초로 산정한다.

- 원칙로 좌우 $\pm 90^\circ$ 에서 각 침로별로, 본선의 선수가 그 방향으로 향할 때 선박 운항자가 주변 선박에 대하여 느끼는 위험감(SJ_s)와 선박 운항자가 조

선 환경(육지 물표)에 대하여 느끼는 위험감(SJ_L)를 각각 비교한다.

- 각 침로에 대하여 위험이 가시화되는 경우, 각 값 중 큰 값을 선택한다.
- 원침로 좌우 $\pm 90^\circ$ 에서 선택된 위험값을 합친다.

이 결과를 그 순간에 통합한 것이 종합 환경 스트레스치라 하며 식(2.11)과 같다.

$$ES_A = \sum_{\psi} \max(SJ_L, SJ_S) \quad (2.11)$$

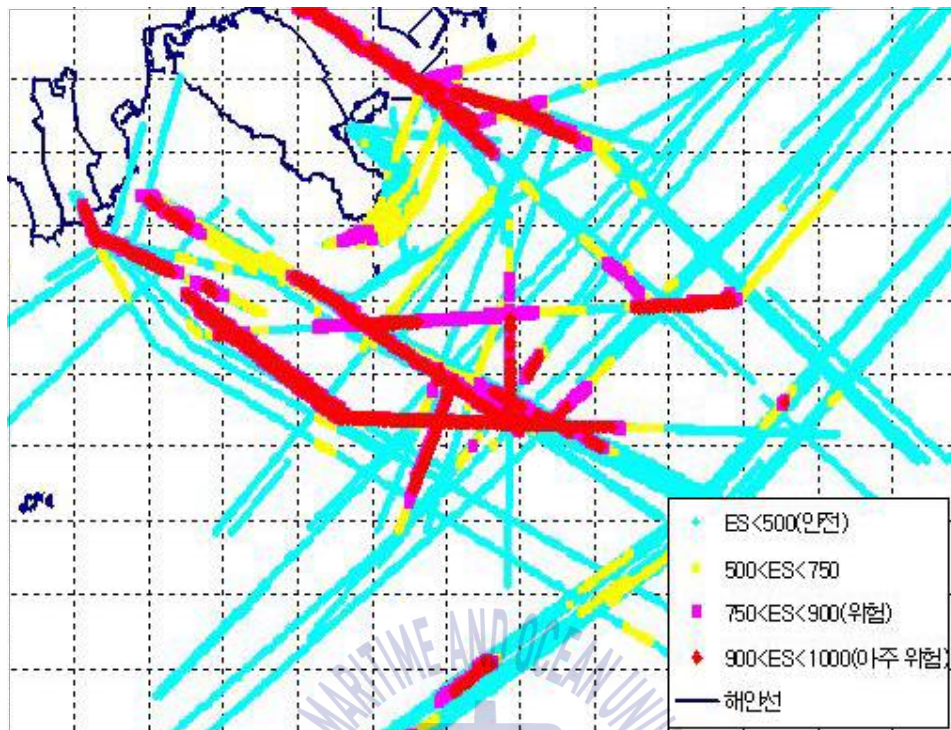
2.3.2 부산항 인근 해역 평가 결과

부산항은 북항, 감천항과 남외항 정박지로 구성되어 있으며, 부산 신항, 마산항 그리고 울산항 등 주요항만과 인접해 있고 대한해협을 통항하는 선박이 많아 위험한 조우 상황이 빈번하게 발생하는 곳이다.

Fig. 2.12는 ES Model을 이용하여 해상교통류 시뮬레이션으로 피크타임 시간대의 선박 통항을 재현한 부산항 인근 해역의 종합 환경 스트레스치의 분포도를 나타낸 것으로 붉은색 부분이 위험도가 높은 해역이다(해양수산부, 2006). 부산항 및 감천항의 진·출입 해역과, 부산항 및 인근항을 출입하는 선박과 대한해협을 통항하는 선박이 교차하는 해역이 위험도가 높게 분석되었다.

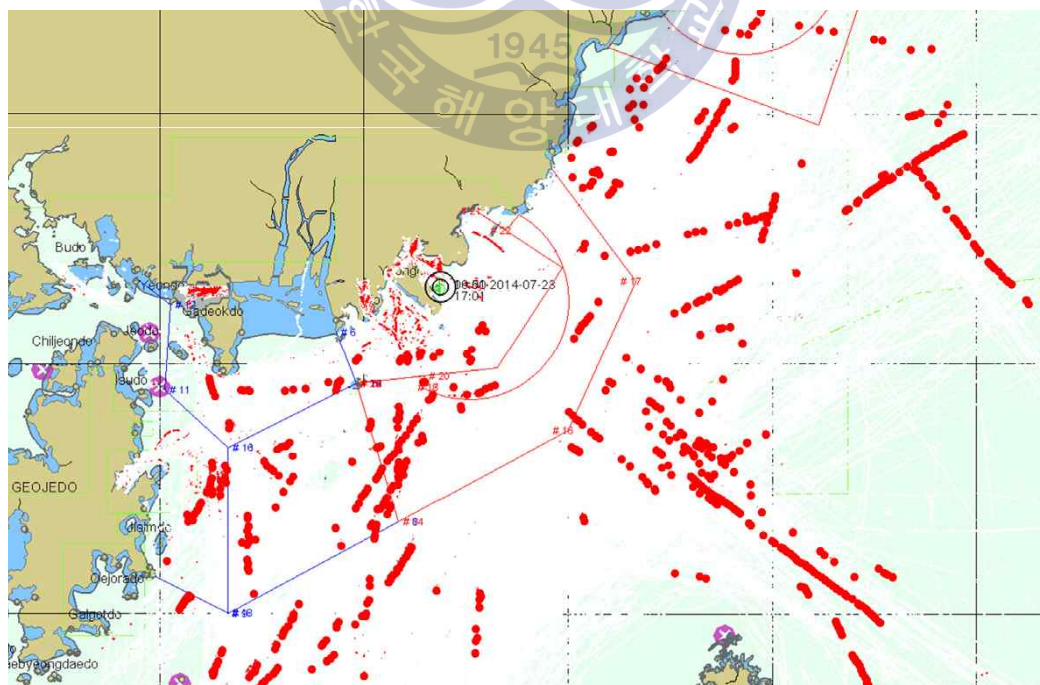
다음은 부산권 해역의 1주일간 AIS 데이터를 기반으로 모든 선박에 대하여 ES 모델을 적용한 결과 Fig. 2.13과 같이 붉은색으로 표시된 해역의 위험도가 높게 평가되었다(남해지방해양경비안전본부, 2014).

목도 남측 해역과 부산항·감천항·남외항 정박지 진·출입 해역, 가덕수도 접근항로 및 부산 신항 진·출입 해역, 그리고 부산항과 대한해협 사이, 간절곶 남측해역이 위험 해역으로 평가되었다.



출처 : 부산항 인근해역 해상교통 환경평가 연구 보고서, 2006

Fig. 2.12 The evaluation result of BUSAN through ES Model



출처 : 부산권해역 VTS 체계개선 기본조사설계 용역, 2014

Fig. 2.13 The evaluation result of BUSAN coastal area through ES Model

이상에서 살펴본 바와 같이 ES 모델은 본선을 둘러싸고 있는 주변 환경을 조선환경과 교통 환경으로 구분하고, 이 두 환경이 선박 운항자에게 가해지는 스트레스의 정도를 정량적으로 평가하기 위해 개발된 모델이다. 이 모델은 조선환경과 교통 환경이 선박 운항자의 행동을 제약할 때 선박 운항자에게 가해지는 부하의 크기를 행동 제약에 따른 조선 곤란감에 기초하여 정량한 것으로, 설문조사를 바탕으로 위험도 모형 요소를 전장별, 조우 형태별, 그리고 타선박과의 거리에 따라 분석하여 위험값을 구한다.

그러나 일본에서 개발되어 선박 운항자의 피항 영역을 일반화한 것으로 운항자의 국적이나 경력 및 자격에 따라 주관적 위험도에 차이가 있으며, 이에 따라 적합한 평가모델의 가중치를 별도로 산정해야 하고(김인철, 2016), 항계 내 및 항계 밖 연안 항해 시 적용하는 위험도가 동일하다는 문제점이 있다(해양과학기술진흥원, 2010).

2.4 PARK 모델

ES 모델이 일본의 지형 및 선박 운항자를 대상으로 구축된 모델이라면 PARK 모델(The Potential Assessment of Risk, 이하 PARK 모델)은 우리나라 해기사를 대상으로 설문조사(허태영 등, 2012)를 하고 선박 운항자가 느끼는 위험도와 한국 연안의 특징을 반영한 선박 조종 시뮬레이션 검증(Park et al., 2013) 등을 통하여 최근접거리와 최근접시간에 대한 위험도를 계산한다.

위험성은 선종, 총톤수, 길이, 폭, 당직 항해사의 경력 및 면허, 선박 길이, 조우형태별, 좌·우현별, 항계내외, 선박 속력, 타선박과의 속력차, 타선과의 거리 등에 의존한다는 결과에 따라 수립된 모델이다(박영수 등, 2015).

2.4.1 PARK 모델 계산 방법

선박 운항자의 위험의식을 바탕으로 본선의 선박 길이는 100m로 일정하고, 선박 대표 길이별(80m, 150m, 280m)로 마주치는 각도(045° , 090° , 135°)와 추월 및 정면으로 마주치는 경우, 좌현 또는 우현에서 선박을 조우하였을 경우,

항계 내 및 항계 밖에서의 경우, 타선과의 속력이 비슷하거나 또는 느리거나 빠를 경우 그리고 설문지에서 주어진 각 거리에서 타선과의 거리에 따라 선박 운항자가 느끼는 주관적 위험도를 Fig. 2.14와 같이 7점 척도로 수집한 자료를 통해 분산분석과 다중비교를 하여 위험도 모델을 구축하였다(허태영 등, 2012).

이 모델은 식(2.12)와 같이 본선 선박 종류(type), 톤수(ton), 선박 길이(length), 선박 폭(width), 타선이 접근하는 각도(crossing factor) 및 방향(side factor), 항 내 및 항외, 선박 간 속력 차이, 선박 간 거리, 운항자의 경력, 직급, 면허 등을 고려하였다(박영수 등, 2015).

$$Risk = 5.081905 + (T_p + T_f + L_f + W_f + C_f + L_{of} + P_f) + (0.002517L + C_f + S_f + H_{i/o} + S_p - 0.00493S_d - 0.43071D) \quad (2.12)$$

여기서, T_p : own ship's type factor

T_f : own ship's ton(GT) factor

L_f : own ship's length(m) factor

W_f : own ship's width factor(m)

C_f : own ship operator's career factor

L_{of} : own ship operator's license factor

P_f : own ship operator's position factor

L : target ship's LOA (m)

C_f : approaching crossing factor of target ship

S_f : approaching side factor of target ship

$H_{i/o}$: in/out harbor factor of own ship

S_p : speed(kt) factor between ships

S_d : speed(kt) difference between ships

D : distance between ships (NM)

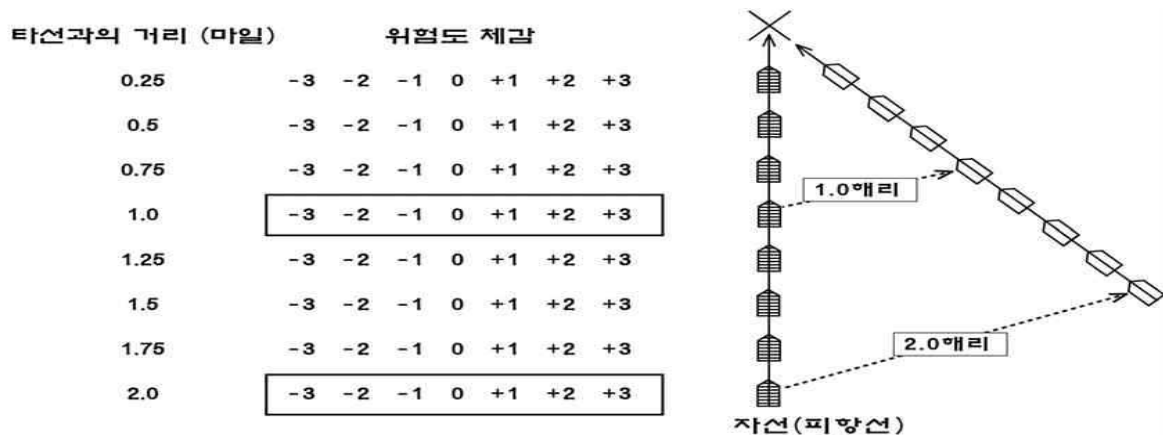


Fig. 2.14 Example of survey form(허태영 등, 2012)

식(2.12)에서 계산된 위험도 값 중 1~3은 안전하다고 식별된 상황, 3~5은 안전하지도 위험하지도 않은 상황, 5이상은 위험한 상황으로 구분하여 판단한다.

2.4.2 평가 결과

PARK 모델의 신뢰도 검증을 위하여 부산항 인근 해역의 교통량을 7일간 조사하였다. Fig. 2.15은 ES모델 스트레스치가 500 이상인 선박 척수와 PARK 모델 위험도가 4.0 이상인 선박 척수를 조사하여 그 비율이 80% 이상이면 붉은 색, 20% 이하는 흰색으로 해역별로 표시하였고 과거 5년간 발생한 해양사고 위치를 점으로 표기하였다.

그 결과 Fig. 2.15의 A 해역은 두 모델 모두 위험도가 낮게 나타났고 항만 안쪽과 접근 수로는 위험도가 높게 나타났다. 그러나 부산과 울산 사이 연안 해역(C)에서는 PARK 모델에서만 과거 해양사고 자료와 일치한 결과를 나타냈다(Nguyen,2013).

이 결과로부터 일본 선박 운항자가 느끼는 주관적 위험도와 한국 선박 운항자가 느끼는 주관적 위험도가 다소 차이가 있으며, 평가 해역의 항해 경험 및 친숙도 등에 따라 모델의 가중치를 별도로 산정해야 할 필요가 있음을 알 수 있다.

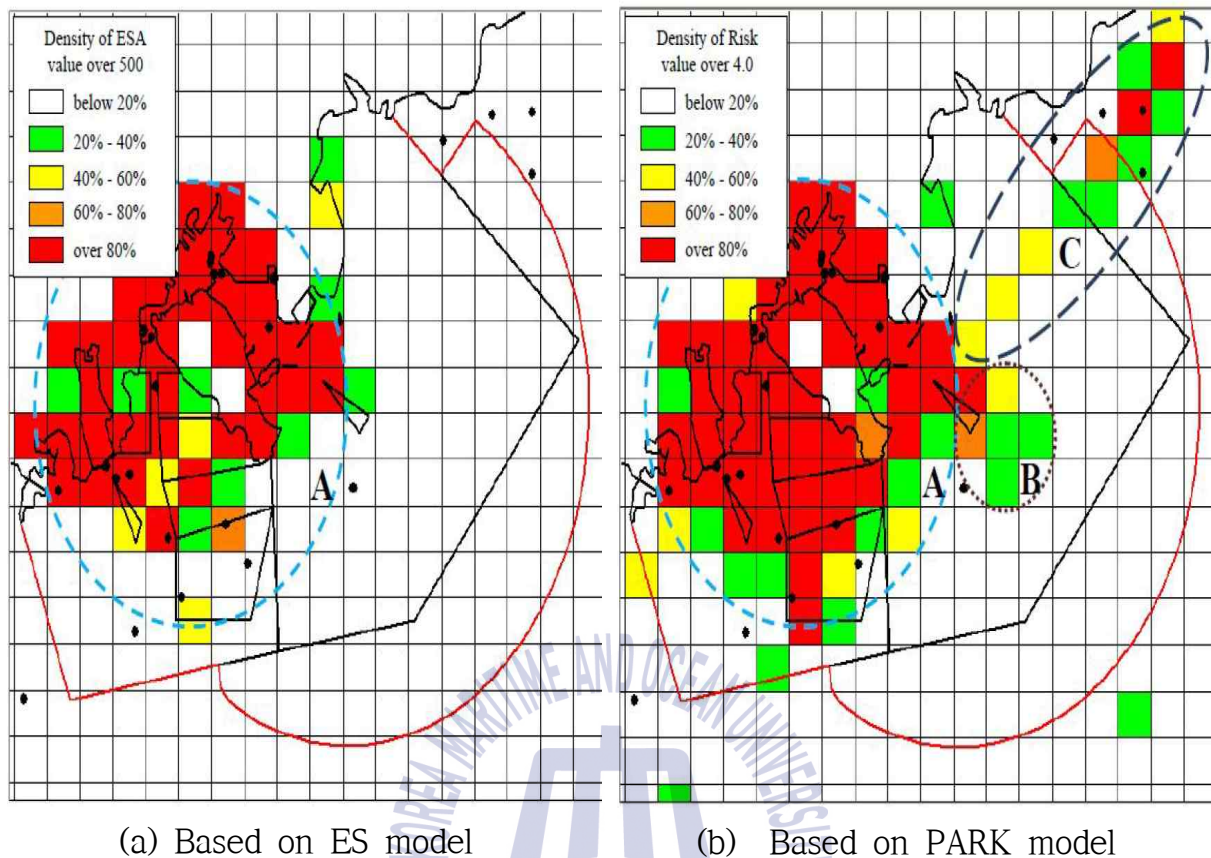


Fig. 2.15 Hazard maps (Nguyen,2013)

2.5 그 외 평가모델

2.5.1 Sech 함수를 이용한 충돌 위험도

쌍곡선(Hyperbolic secant, Sech)함수를 이용한 충돌 위험도 평가법(Jeong, 2003)은 식(2.13)과 같이 x 축이 0에 가까워질수록 최댓값이 된다. 즉, $dcpa$ 가 0에 가까울수록 $dcpa$ 에 따른 최대 위험도 값은 1이 된다.

$$\text{sech}(t_a) = \frac{1}{\cosh(t_a)} = \frac{2}{e^{t_a} + e^{-t_a}} \quad (2.13)$$

이 sech함수를 이용한 충돌 위험도(CR) 평가식은 식(2.14)와 같다.

$$CR = p \cdot \text{sech}(a \cdot dcpa) + q \cdot \text{sech}(b \cdot t_a) + r \cdot \Phi(\theta, a) \quad (2.14)$$

p, q, r : sech함수의 진폭 결정 계수

a, b : sech함수의 변화 정도(기울기) 결정 계수

$t_a = \frac{R}{v_r \cos \zeta}$: 목표까지의 접근시간

$\Phi(\theta, a)$: 본선의 상태를 결정하는 함수

여기서, $\Phi(\theta, a)$ 는 본선이 유지선 혹은 피항선 등의 상태를 결정하는 함수로써 본선이 유지선일 때는 0, 피항선일 때는 1로 정의한다.

계산 예로 본선이 피항선이고 계수 p, q, r 을 1로, $dcpa, t_a$ 을 0 이라 가정하면 충돌 위험도(CR)의 최댓값은 3이 된다.

이 충돌 위험도 평가식은 $dcpa$ 가 0에 가까울수록 $dcpa$ 에 다른 최대 위험도 값을 1로 하여 우리의 직관과 일치시켰다. 그러나 이 평가식은 $dcpa$ 가 작을 때, t_a 가 음수이거나 접근시간이 충분히 남아있어도 $dcpa$ 의 영향으로 충돌 위험도가 1에 가까운 값을 가지게 되는 문제점이 있다.

이를 해결하기 위하여 진폭계수 p 를 작게 조정하거나 본선의 상태결정함수 $\Phi(\theta, a)$ 를 활용하면 된다고 언급되어 있으나(Jeong, 2003) 최적화된 계수 값을 결정하는 관련 연구는 이루어지지 않았다.

2.5.2 퍼지기반 충돌 위험도 추정 알고리즘

퍼지알고리즘을 이용한 충돌 위험도는 i 는 자선, j 는 자선을 제외한 타선의 순번, k 는 i 번째 자선의 방향별 위험도를 계산하기 위한 순번을 의미하며, 이를 식으로 나타내면 식(2.15)와 같다(손 등, 2009).

$$CR_{j,k}(i) = f_{fuzzy} \left(\frac{TCPA_{j,k}(i)}{L/V}, \frac{DCPA_{j,k}(i)}{L} \right) \quad (2.15)$$

본선 주변의 일정방향(θ)에 대한 i 선박에 대한 각 방향별 위험도에서 k 방향에 대해 타선박의 위험도 중 최댓값을 선택한다.

현재 침로를 0도라면 좌현(-090도)부터 우현(+090도)까지 각 방향별 충돌 위험도를 5도 간격으로 구한다. 즉, 현재시간 t 에서 자선의 총체적인 충돌 위험도는 식(2.16)과 같다.

$$CR(t) = \frac{\int_{-90}^{+90} CR(\theta) \cdot w(\theta) d\theta}{\int_{-90}^{+90} 1 \cdot w(\theta) d\theta}, \text{ 여기서 } |\theta| \leq 90 \text{ deg, } w(\theta) = \cos\left(\frac{90}{110}\theta\right) \quad (2.16)$$

일반적으로 대양에서 위험도가 0.6이상인 경우 주의가 필요하고, 0.8이상인 경우 충돌이 임박한 상황으로 간주된다.

2.5.3 Safety Index를 이용한 안전평가 방법

SI(Safety Index, 이하 SI)는 선박 교통 환경에 대한 항해사의 인지능력을 수치적으로 나타낸 것으로, 11개 항목(Type of ship, length of ship, loading state, Relative speed, distance between ships, encounter situations, Time, day)에 대한 설문을 실시하여 항해사 53명으로부터 응답을 받아 구하였다(Hwang et al., 2002).

응답 자료를 분석하여 각 항목별 항행 안전 영향정도를 식(2.17)과 같이 평균하고, 이를 합하여 식(2.18)과 같이 SI를 구하였다.

$$I_j = \frac{\sum_{i=1}^N R_{ij}}{N} \quad (2.17)$$

$$SI = \sum_{j=1}^J I_j \quad (2.18)$$

I_j : j 항목의 평가 평균값(최소=1, 최대=9)

j : 설문항목 수(1~11)

R_{ij} : i 응답자가 j 번째 설문항목에 답한 값(1~9)

N : 응답자의 수

i : 1~9 범위에서 항해사의 답변

SI : 11개 항목 I_j 의 총합

2.6 조사 분석 결과 종합

이 장에서 조사한 국내외 해상교통 평가모델에 대한 분석 결과는 Table 2.4와 같다.

이처럼 국내외 해상교통 평가모델은 전문가 자문을 통하여 결과를 도출하는 정성적인 방법과 선박 교통량 및 수로 정보 등을 기초로 연간 충돌 및 좌초 위험을 예측하는 정량적인 방법, 그리고 선박 운항자의 경험과 지식을 기반으로 개발된 모델이 주를 이루고 있다.

정성적 평가모델은 항만 및 항로의 전반적인 위험을 평가하고 이에 대한 개선 방안을 도출하는 데 유리하고, 정량적인 모델은 일정 기간의 선박 교통량과 수로 정보 등 다양한 정보를 기초로 평가 해역의 연간 충돌 및 좌초 확률 예측이 가능하지만, 실시간으로 변화하는 선박 움직임에 따른 선박 간 충돌 위험을 구하기는 어려운 점이 있었다.

Table 2.4 Analysis result of risk assessment models

| 평가모델 | 특징 및 분석결과 |
|------------|--|
| PAWSA | <ul style="list-style-type: none"> ○ 전문가 그룹에 의한 위험지수 발견 및 해결방안 도출 ○ 전문가로 구성된 각 그룹(소수의견 포함)의 의견 통계 처리 ○ 대표적인 정성적 평가모델 ○ 전문가 구성 및 이해관계에 따라 상이한 결과 도출 우려 |
| IWRAP | <ul style="list-style-type: none"> ○ 선박교통량·수로정보 등을 기초로 연간 충돌 및 좌초 확률 예측 ○ 정량적인 평가모델 ○ 충돌을 피하기 위한 급격한 선박 조종의 변화를 배제하여 계산 ○ 선박 통항 항적이 복잡한 해역에서는 적용이 어려움 ○ 각 항만 및 해역 특성에 맞는 Causation Factor 연구 부족 |
| ES Model | <ul style="list-style-type: none"> ○ 주변 환경에 의한 선박 운항자 조선 곤란감에 기초한 모델 ○ 선박 운항자의 스트레스치를 정량화 ○ 해상교통 안전진단제도에서 가장 많이 적용중인 모델 ○ 선박 운항자의 국적 및 경력에 따른 주관적 위험도 차이 발생 ○ 항계 내·외, 연안 해역별 위험도 적용 기준이 동일함 |
| Park Model | <ul style="list-style-type: none"> ○ 국내 선박 운항자가 느끼는 위험도와 한국 연안의 특징을 반영 ○ 선종, 총톤수, 길이, 폭, 항해사 경력 및 면허, 조우형태, 항내 외, 선박 간 속력차 등 다양한 요인 고려 ○ 선박 운항자의 국적 및 경력에 따른 주관적 위험도 차이 발생 |
| 기타 모델 | <ul style="list-style-type: none"> ○ sech함수를 이용한 충돌 위험도 ○ 퍼지기반 충돌 위험도 ○ SI(선박 교통 환경에 대한 항해사의 인지능력의 전체 합) 이용 |

또한, 선박 운항자의 경험과 지식을 바탕으로 개발된 모델은 항해사의 국적과 자격에 따라 결과가 다르고, 항행하는 해역이 해당 항해사에게 얼마나 친숙한지에 따라 항해사가 느끼는 실제 상황과 모델 결과 값은 다를 수 있다. 그리고 오늘날 대부분 선박에는 다국적 선원이 승선하고 있어 특정 국가의 선박 운항자를 기반으로 만들어진 모델을 보완하기 위한 연구가 필요하다.

선박 간 충돌 위험은 각 선박의 당직 항해사가 위험 여부를 판단하여 그에 따른 적절한 조치를 하는 것이 일반적이나 국내에서 발생하는 충돌사고 대부분이 선박의 경계 소홀 등 상대 선박을 조기에 인지하지 못하여 발생하고 있다. 이러한 선박 운항자의 인적요인으로부터 발생할 수 있는 위험을 보완하고 선박 통항의 안전과 효율성 증진을 위하여 우리나라에서는 항만과 연안에 18개의 VTS를 설치·운영하고 있다.

VTSO의 상황인식(Situation Awareness, 이하 SA)을 음성 교신 내용을 기초로 수준별로 분석한 결과, 제1수준에서는 선명 확인(21.80%) 및 선박 위치 확인(14.99%) 그리고 선박의 목적지, 출항지 등 운항 계획 확인(7.35%)에 높은 빈도를 보였다. 제2수준에서는 선박 간 CPA(Closest Point of Approach, 이하 CPA)와 TCPA(Time to the Closest Point of Approach, 이하 TCPA)를 확인하는 것(4.63%)이 가장 높은 빈도를 보였고, 제3수준에서는 선박의 미래 경로를 예측하는 것(3.76%), 선박 간 충돌의 위험을 예측하는 것(2.92%), 그리고 침로 변경을 권고해야 할 선박이 무엇인지 미리 파악하는 것(1.82%) 이었다(Lee et al., 2016).

이는 VTSO가 SA의 세 수준 중 제1수준에 해당하는 정보지각(information perception) 과제를 주로 수행하며, 상대적으로 발생빈도는 낮지만, 관련 정보를 통합(information integration)하고 예측(prediction)하여 선박 충돌 위험 상황을 인지하는 과정으로 선박 간 CPA와 TCPA를 확인하고 선박의 경로를 예측함으로써 선박의 안전한 통항을 유도하고 있음을 알 수 있다.

이처럼 선박의 충돌사고 예방과 원활한 선박 교통흐름을 위하여 VTS 시스템을 통해 선박의 움직임을 실시간으로 모니터링하고 충돌 위험 상황을 인지하는

과업을 수행하는 VTSO의 역할은 선박 충돌 사고의 예방에 있어서 매우 중요하며, 따라서 VTSO 관점에서 사전에 통항 선박의 움직임을 예측하고 관련 정보를 해당 선박에 제공함으로써 해상 교통의 안전을 확보하기 위한 평가모델 개발은 중요한 의미를 있다.





제 3 장 VTSO의 선박 충돌 위험지수

VTSO의 관제 업무 시 선박 간 충돌 위험 상황이 어느 정도 발생하고 있는지를 파악하고자 부산항, 부산 신항, 울산항 그리고 마산항의 VTSO 65명을 대상으로 설문조사를 한 결과, 주간 근무시간(2시간 단위) 중 선박이 근접하여 야기되는 위험한 순간은 주간 평균 6.3회, 야간 평균 5회로 조사되어 주간에는 평균 19분마다 야간에는 평균 24분마다 위험한 교통 상황이 발생하고 있는 것으로 나타났다(박영수 등, 2015).

또한, 관제구역 내에서 지속해서 발생하는 충돌 위험 상황을 해결하려는 방안으로 충돌 위험예측 모듈의 필요성과 실제 관제 업무에 도움이 되는지에 대한 효용성을 조사한 결과, 응답자의 68.3%(41명)가 모듈이 필요하다 하였고 66.1%(39명)가 도움이 될 것이라 답변하였다(박영수 등, 2015).

이에 본 논문에서는 선박의 충돌 위험을 VTSO 관점에서 예측하기 위한 평가 모델 개발을 위해 선박 조우 상황, 충돌 임박까지 남아있는 여유 시간 그리고 근접 통과 시 최소 이격거리에 따른 VTSO의 위험 정도를 조사하였다.

조사 결과, VTSO 관점에서 조우 상황을 판단하기에 CPA에서의 상대방위에 따른 선박 조우 상황에 따른 위험지수(E_{ij})가 타당한지를 검증하였고, 양 선박의 충돌 위험이 임박한 상황에서 남아 있는 여유 시간에 따라 VTSO가 느끼는 위험 정도를 조사하여 선박 간 최단 접근시간에 따른 위험지수(T_{ij})를 구하였다.

그리고 양 선박이 최대로 근접 통과 시 VTSO의 최소 안전거리를 조사하여 선박 간 근접거리에 따른 위험지수(A_{ij})를 구하고 식(3.1)과 같이 VTSO의 충돌 위험지수(RI)를 구하였다.

$$RI = E_{ij} \cdot T_{ij} \cdot A_{ij} \quad (3.1)$$

E_{ij} : i 선박과 j 선박의 조우 상황에 따른 위험지수

T_{ij} : i 선박과 j 선박 간 최단 접근시간에 따른 위험지수

A_{ij} : i 선박과 j 선박 간 근접거리에 따른 위험지수

각 위험지수에 적용한 sech(hyperbolic secant) 함수는 대입하는 값이 커질수록 0에 수렴하는 함수로서 양 선박이 충돌까지 거리가 충분히 멀고 시간이 많이 남아있다 하더라도 선박의 존재 자체가 어느 정도의 위험을 내포하고 있다.

E_{ij} 는 CPA에서의 상대방위에 따라 위험값을 유도하였으므로 양 선박이 어떻게 조우하더라도 일정 수준 이상의 값이 존재하고, A_{ij} 는 VTSO의 Safety domain을 CPA로 이동하여 양 선박의 근접거리에 따른 위험값을 구하였으므로 양 선박이 문제없이 통과하였음에도 일정 거리 이하로 CPA가 계산되면 값이 나타난다.

T_{ij} 가 0에 가깝게 된다는 것은 양 선박이 근접 위험까지 시간적 여유가 충분히 많이 남아 있거나 문제없이 지나쳤음을 의미하고, A_{ij} 가 0에 가깝게 된다는 것은 양 선박이 먼 거리를 두고 서로 통과할 것으로 예상하거나 문제없이 통과하였음을 의미한다.

따라서 T_{ij} 와 A_{ij} 중 어느 하나라도 값이 0에 가깝게 되면 VTSO 관점에서는 양 선박의 충돌 위험이 사라졌거나 해소되었다고 판단할 수 있으므로 각 위험지수의 곱으로 RI 를 구하였다.

다음 각 절에서 VTSO의 충돌 위험 정도 조사 방법과 RI 의 각 위험지수인 E_{ij} , T_{ij} 그리고 A_{ij} 의 유도 과정을 기술하고자 한다.

3.1 VTSO의 충돌 위험 정도 조사 방법

CPA에서의 상대방위에 따른 E_{ij} 가 VTSO 관점에서 조우 상황을 판단하기에 타당한지 아니지를 확인하기 위하여 2015년 9월 15일부터 10월 15일 사이의 기간 부산항·부산 신항·대산항·목포항에 근무하는 VTSO 53명과 해양수산연수

원에서 교육 중인 선박 운항자(Officers of the Watch, 이하 OoW) 52명을 대상으로 [부록 1]과 같이 1차 설문을 실시하였고, 2017년 5월 25일부터 6월 1일 사이의 기간 동안 부산항 VTSO 31명을 대상으로 2차 설문을 하였다.

이때 교통 환경은 항만에 인접한 연안 해역을 기준으로 양 선박이 조우할 때 VTSO와 OoW가 인지하는 위험 정도를 최소 0에서 최대 2.0의 범위 내에서 표시하도록 하였다.

다음으로 2016년 6월 20일부터 7월 15일 사이의 기간 남해해양경비안전본부 소속 3개 VTS 센터와 각 지방본부 소속 2개 VTS 센터 등 총 9개 센터에 근무하고 있는 VTSO를 대상으로 [부록 2]와 같이 양 선박의 충돌 위험이 임박한 상황에서 남아 있는 여유 시간에 따라 VTSO가 느끼는 위험의 정도와 AIS로 확인 가능한 선박 주요 정보가 남아 있는 여유 시간에 미치는 영향 정도를 조사하여 T_{ij} 를 구하였다.

또한, 같은 기간 동안 양 선박이 최대로 근접하여 통과하는 상황을 가정할 때 VTSO의 최소 안전거리를 선박 길이로 환산하여 선박을 중심으로 한 Safety domain을 조사하고 이 Domain 선상으로 타선박이 근접할 때 느끼는 위험 정도를 조사한 자료를 기초로 A_{ij} 를 구하였다.

이때 교통 환경은 항만에 인접한 연안 해역을 기준으로 양 선박이 근접하는 상황에 대하여 설문을 하였고, 총 130명(센터장, 시설과 행정직원 제외)에게 배포하여 70명이 응답하였으며 회신율은 53.8%였다.

3.2 선박 조우 상황에 따른 위험지수

VTSO는 선박 동정을 모니터링하며 충돌 위험 상황을 인지하는 과업을 수행할 때, CPA와 TCPA뿐 아니라 선박 간의 조우 상황을 고려하게 되며, 국제해상 충돌예방규칙(International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972, 이하 COLREG) 등과 같은 관련 규정의 준수 여부를 확인하여 안전한 통항을 유도한다.

관제구역 내에서 VTSO가 선박 간 근접하는 위험 상황을 인지 또는 예측하는

방법을 묻는 설문에서 VTSO의 32%는 VTS 시스템 내의 CPA 및 TCPA 예측 프로그램을 사용하고, 27%는 경험에 의한 조우 패턴에 따라, 18%는 레이더 ARPA(Automatic Radar Plotting Aids) 기능을 통하여, 21%는 선박의 출입항 정보를 통하여 선박의 근접 상황을 예측한다고 응답하였다(박영수, 2015).

이는 VTSO가 선박 충돌위험을 판단할 때 선박 조우 패턴이 CPA와 TCPA 못지않게 중요한 판단 기준임을 알 수 있으며, 이러한 선박 조우 패턴을 본 논문에서는 ‘선박 조우 상황에 따른 위험지수(Risk of Encounter, 이하 E_{ij})’ 이라 정의하였다.

3.2.1 CPA와 TCPA를 이용한 충돌위험 평가의 한계

현재 우리나라 VTS센터의 대부분을 차지하는 Norcontrol사의 VTS 시스템은 선박의 CPA(Closest Point of Approach, 이하 CPA)와 TCPA를 예측하는 기능은 Fig. 3.1(a)와 Fig. 3.1(b)와 같이 실행되며 계산식은 식(3.2)와 같다.

$$CPA = D_{ij} \times \sin(\theta), \quad TCPA = \frac{D_{ij} \times \cos(\theta)}{v_R} \quad (3.2)$$

D_{ij} : i 선박과 j 선박간 거리(NM)

$v_R = |v_j - v_i|$: i 선박과 j 선박의 속력차(knots)

θ : D_{ij} 와 v_R 이 이루는 각

Fig. 3.1(b)의 붉은색 사각형 점은 TCPA가 0일 때 각 선박이 위치하는 점, 즉 CPA를 나타내며 두 점을 연결한 붉은색 실선은 CPA를 나타낸다.

VTSO는 이 기능으로 양 선박의 CPA와 TCPA를 확인하여 충돌 위험 여부를 판단할 수 있지만, 어느 선박을 호출하여 어떠한 조치를 먼저 할 것인지는 VTSO가 주관적으로 판단하고 있다.

Fig. 3.2는 양 선박의 속력이 같고 CPA와 TCPA가 동일할 때, 양 선박의 조우각, 유지선·피항선의 횡단관계에 따라 조우 상황이 어떻게 달라지는가를 비교한 것이다.

Fig. 3.2의 (a)와 (b)는 두 선박이 직각으로 교차하는 상황으로 (a)는 두 선박이 그대로 진행하여도 무방하나, 좀 더 안전을 확보하기 위하여 VTSO는 i 선박(피항선)에게 우현 변침하여 충분히 안전한 거리를 두고 j 선박(유지선) 선미 통과를 권고할 수 있다.

반면 Fig. 3.2의 (b)는 두 선박이 쌍방의 의도와 교행관계를 합의하지 않은 상태에서 접근할 경우, 피항선인 i 선박은 CPA가 충분하다 판단하고 j 선박(유지선) 선수를 횡단할 가능성이 높고, 유지선인 j 선박은 상대 선박을 피하기 위하여 우현 변침을 할 가능성이 높다. 이와 같은 경우 양 선박의 충돌 위험은 매우 높아짐을 직관적으로 알 수 있다.

Fig. 3.2의 (a)에서 (c)로, (c)에서 (e)로 조우각이 좁아질수록 피항선인 i 선박은 충분한 시간을 두고 대각으로 우현 변침을 하여야 안전한 통항이 가능하고, (b)에서 (d)로, (d)에서 (f)로 조우각이 좁아질수록 양 선박의 근접위험은 더욱 높아져 서로 적극적인 회피 동작이 필요할 뿐 아니라 이에 따른 VTSO의 부담도 더 커지게 된다.

특히 Fig. 3.2의 (d)와 (f)와 같은 상황에서 양 선박이 별다른 조치 없이 계속 접근하다가 i 선박은 좌현전타, j 선박은 우현전타를 실시함으로써 충돌 위험을 회피하는 경우가 종종 발생하고 있다.

이러한 충돌 위험을 VTSO 관점에서 사전에 인지하고 계산하는 방법에 대하여 다음에서 고찰하고자 한다.

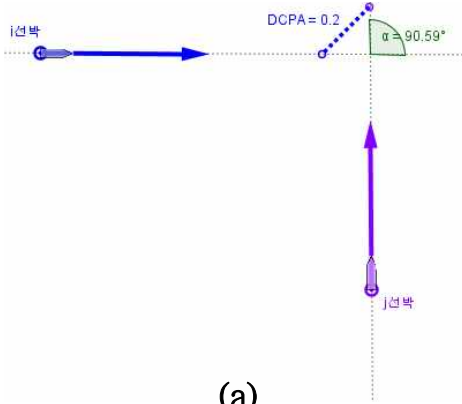
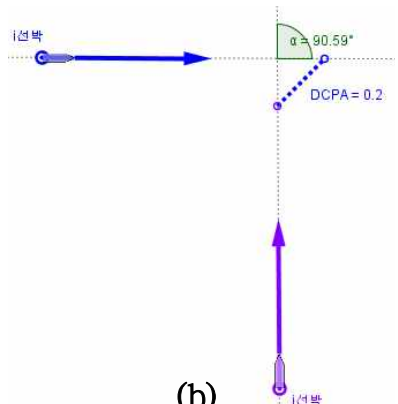
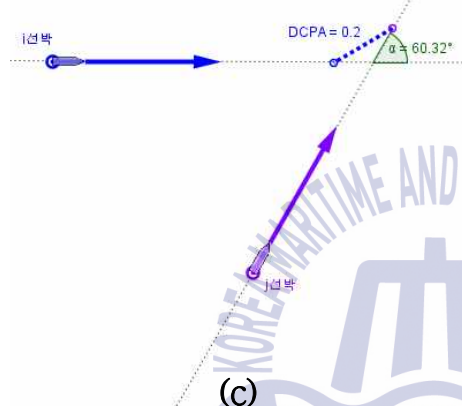
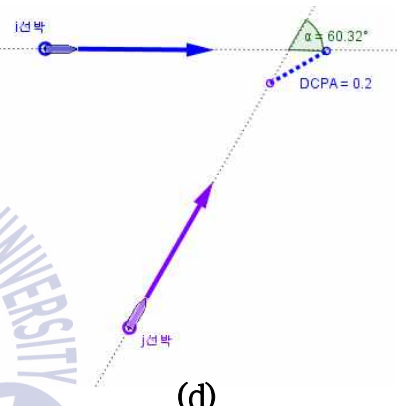
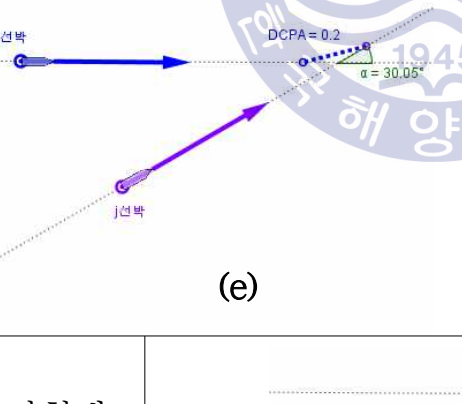
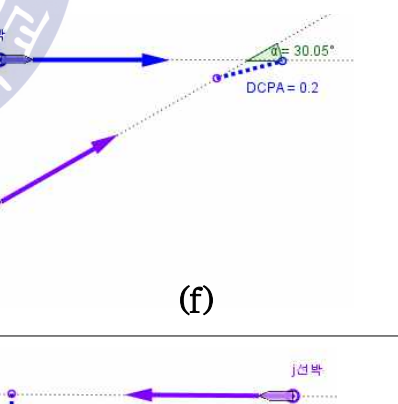
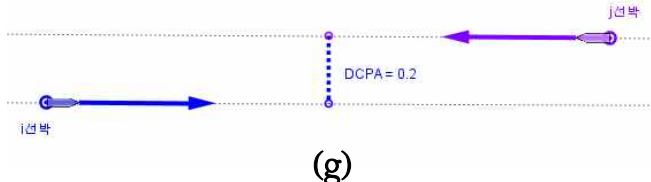
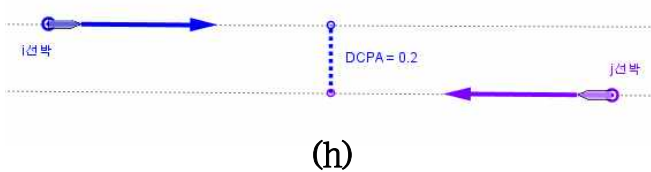
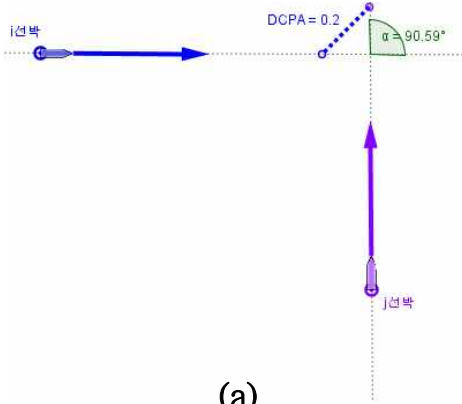
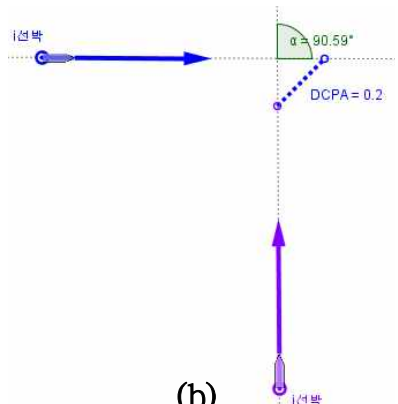
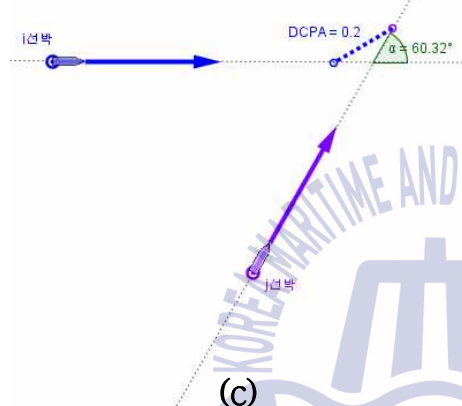
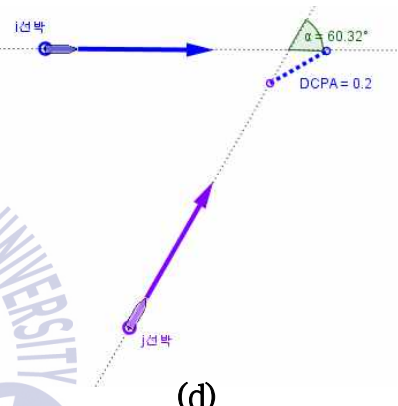
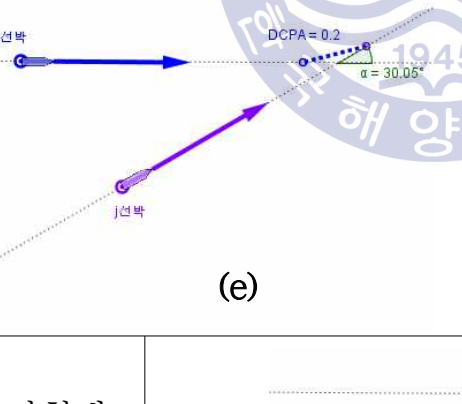
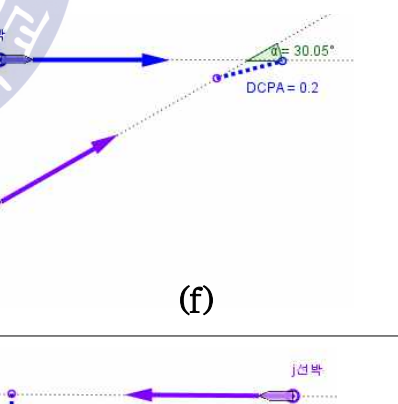
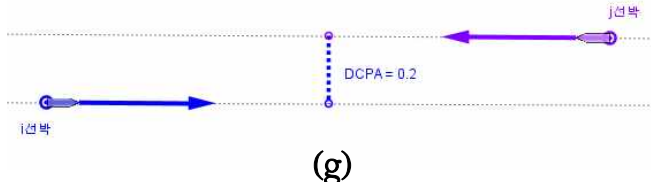
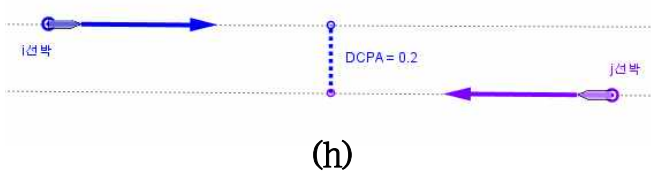
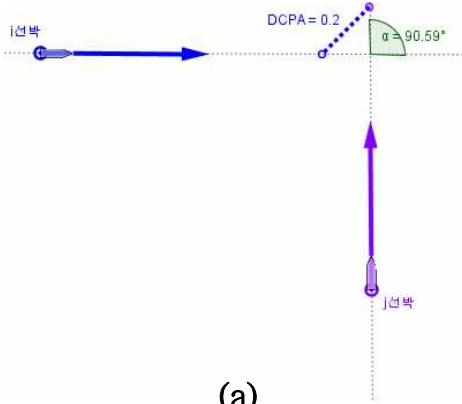
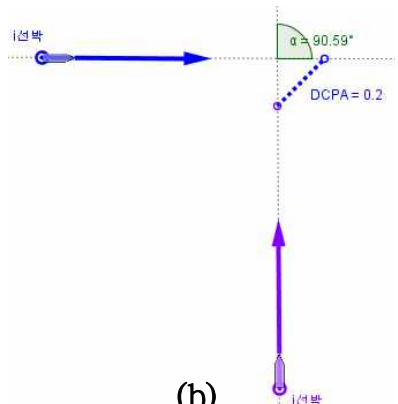
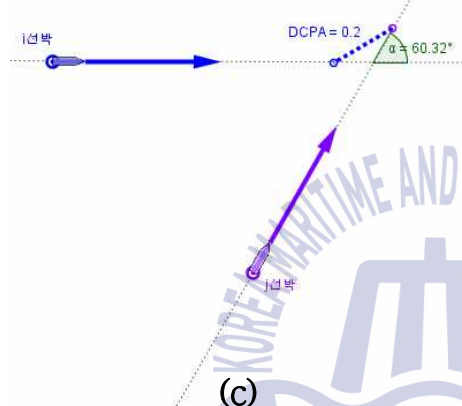
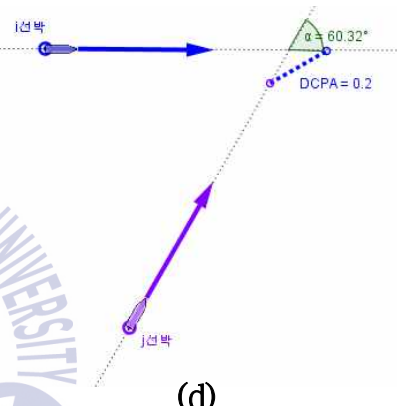
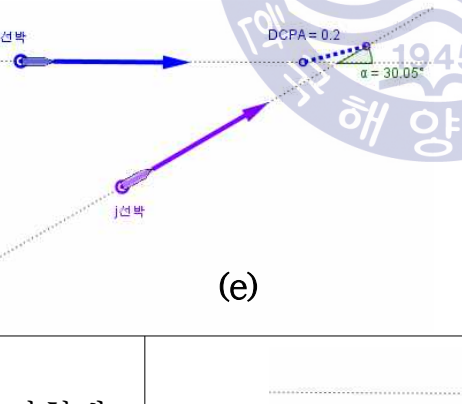
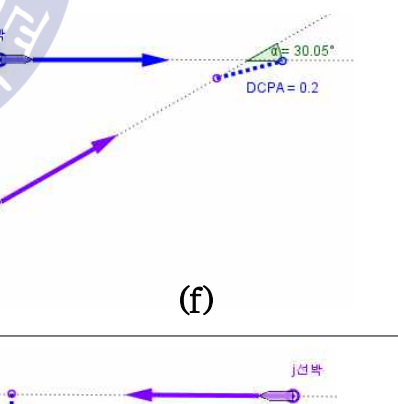
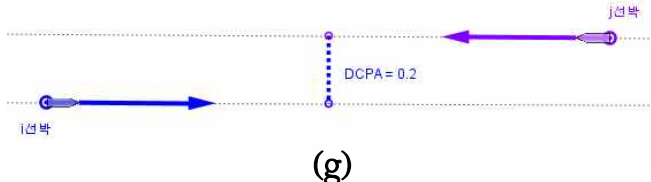
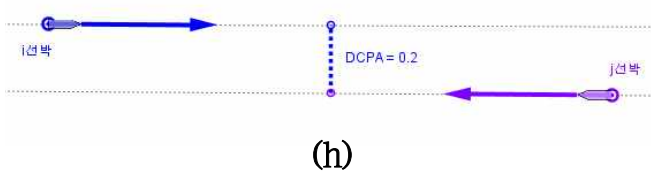
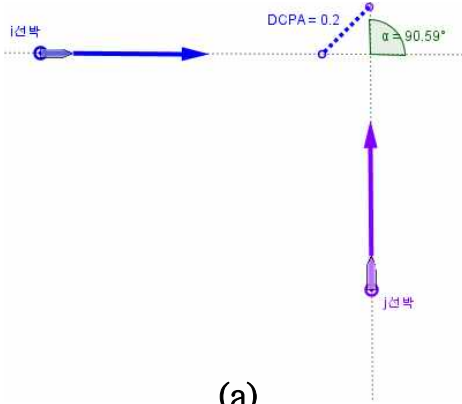
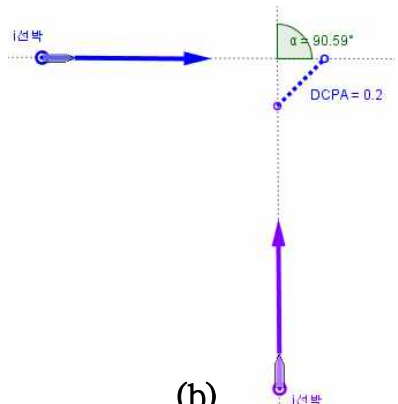
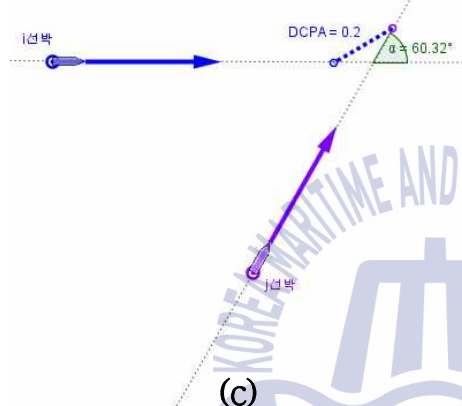
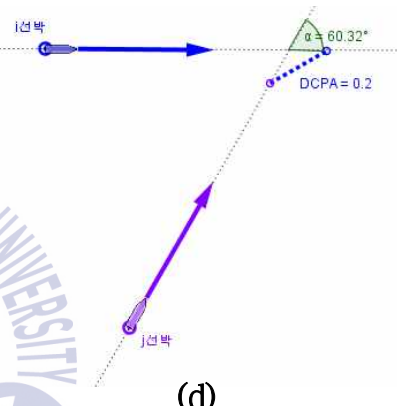
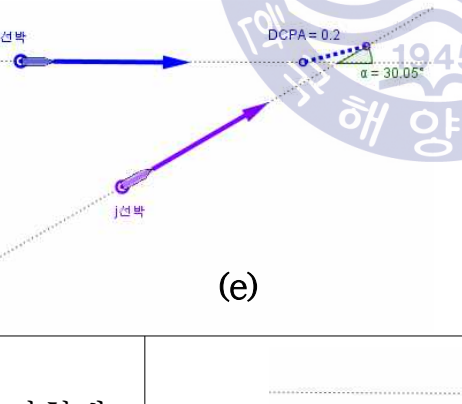
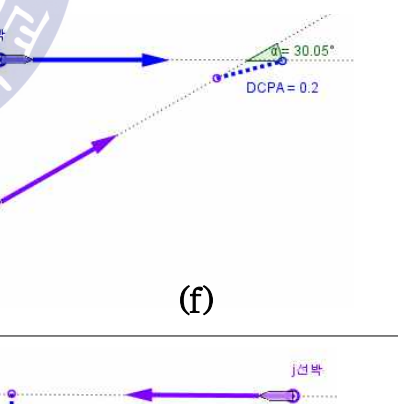
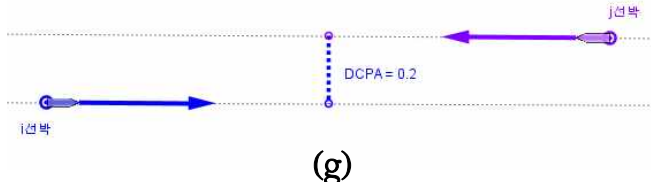
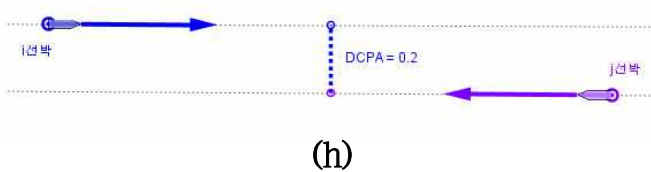
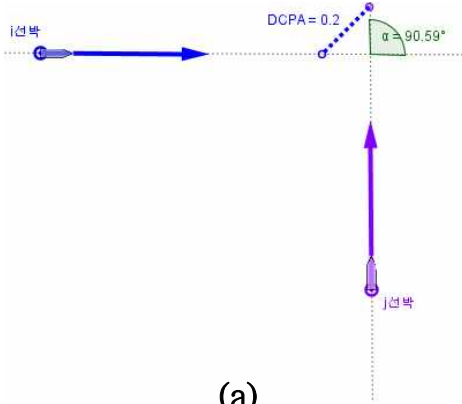
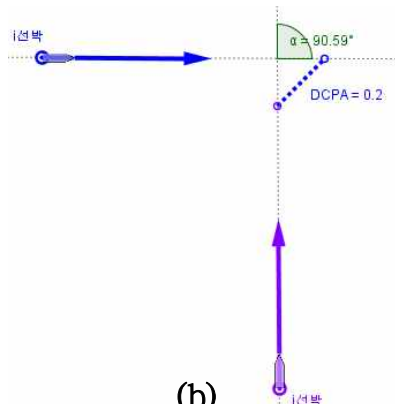
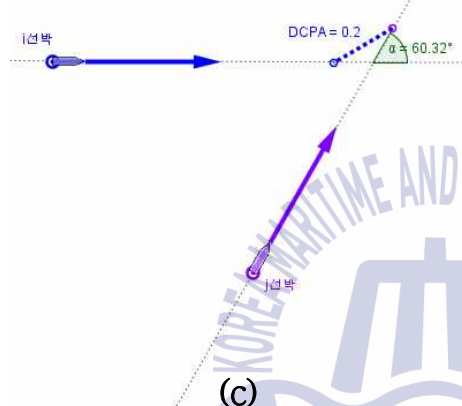
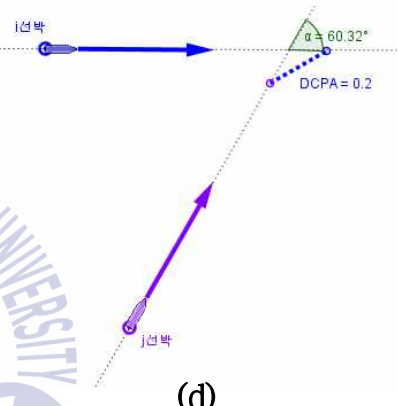
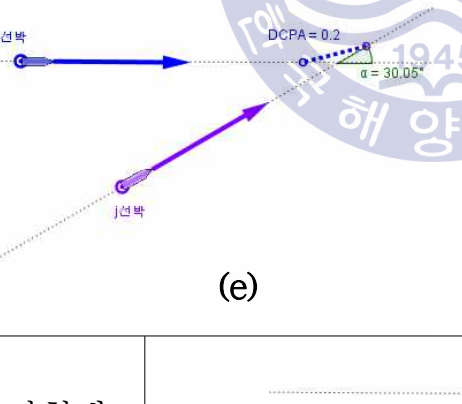
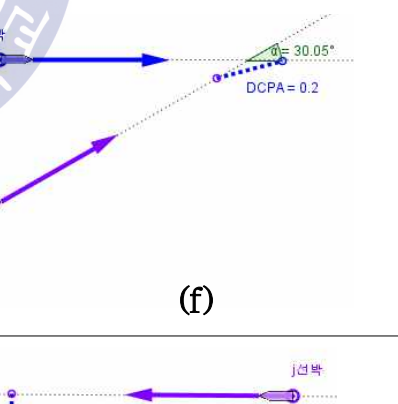
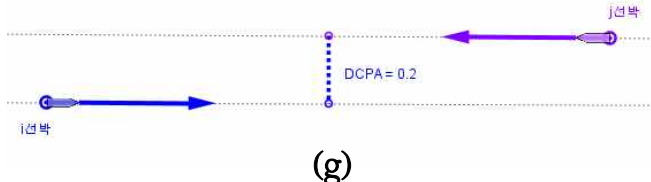
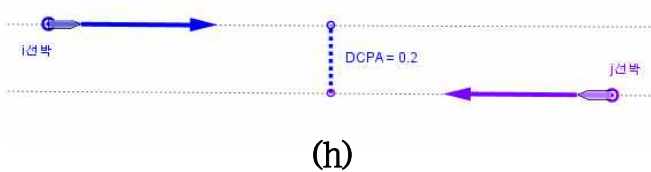
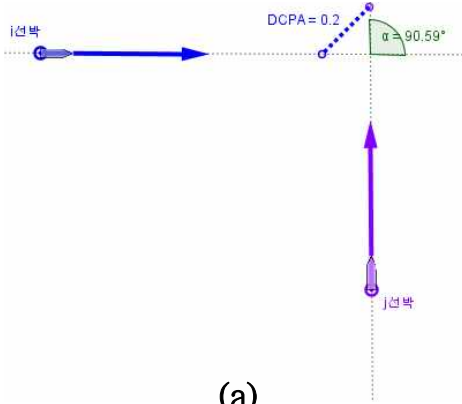
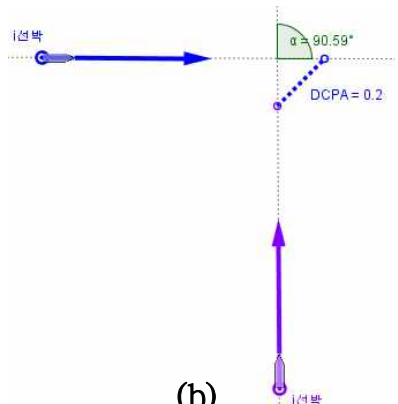
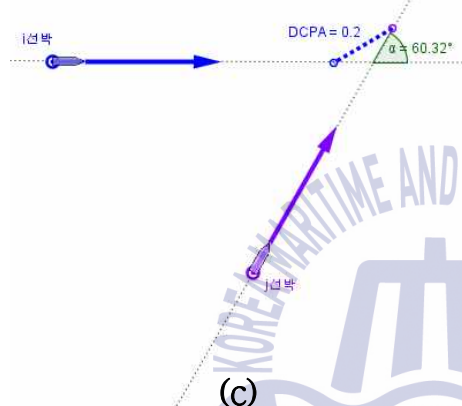
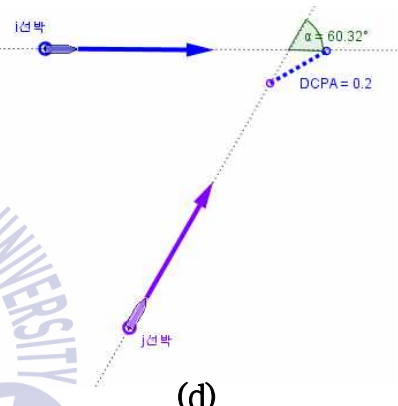
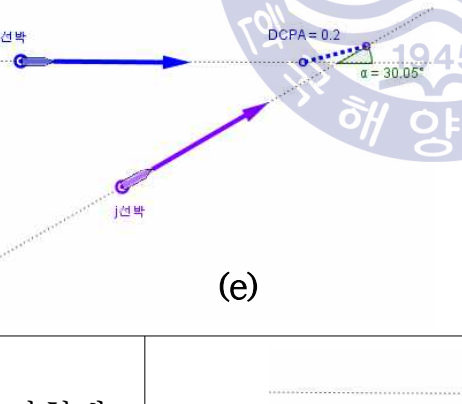
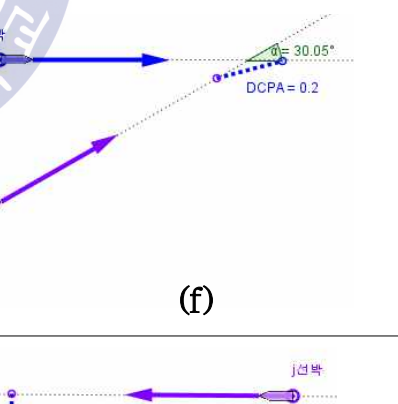
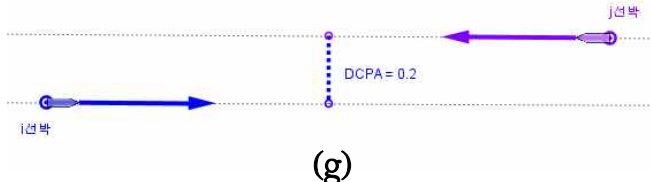
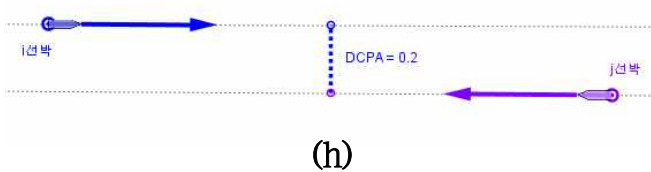
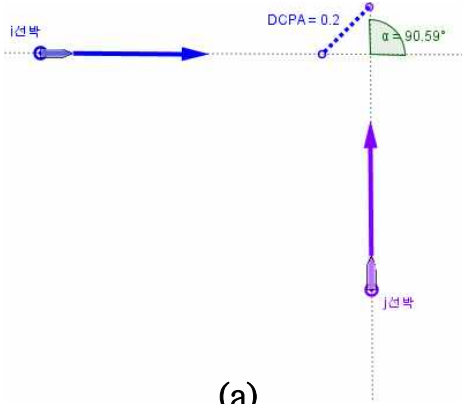
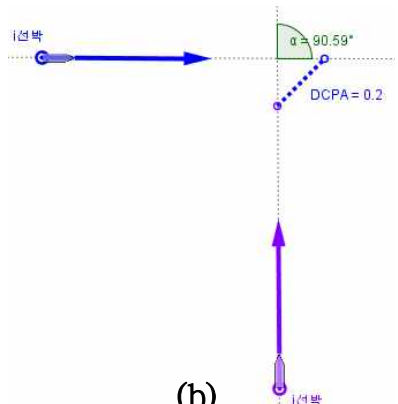
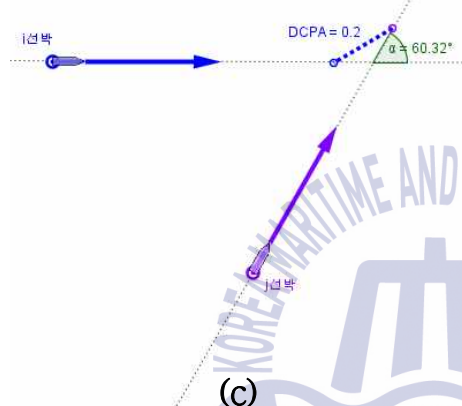
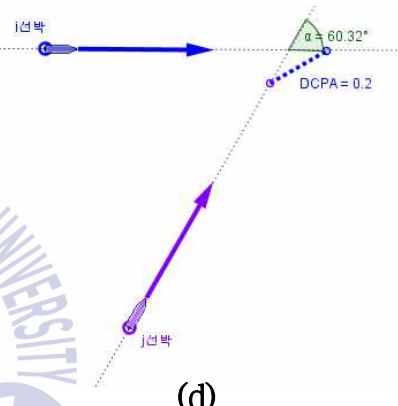
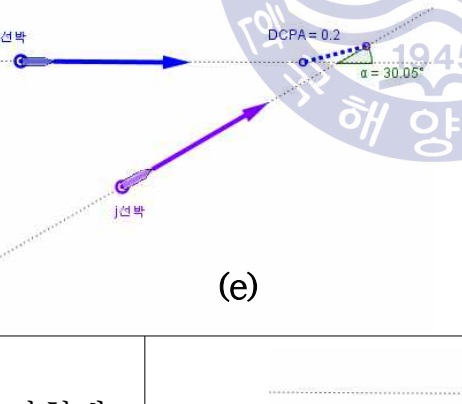
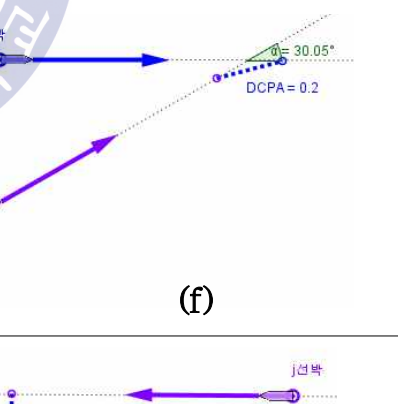
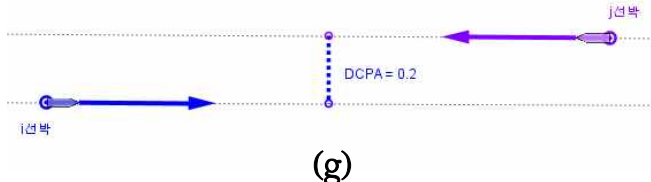
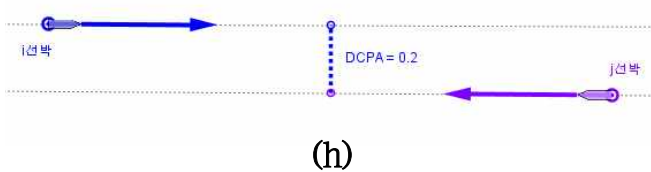
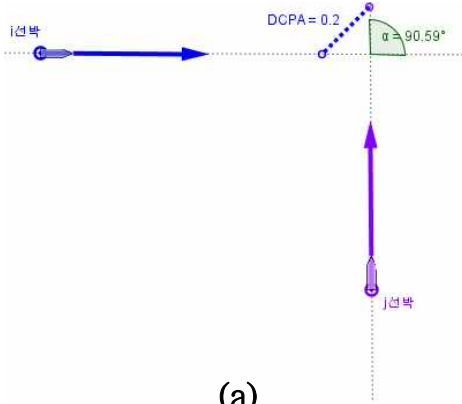
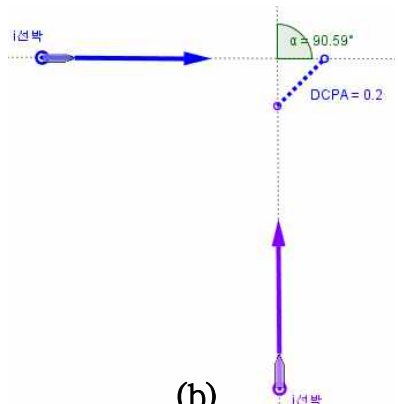
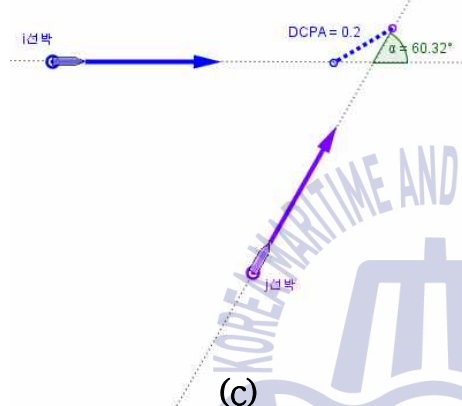
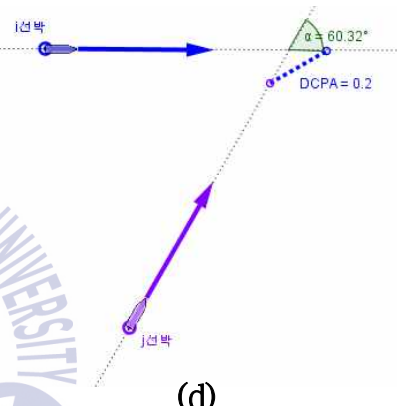
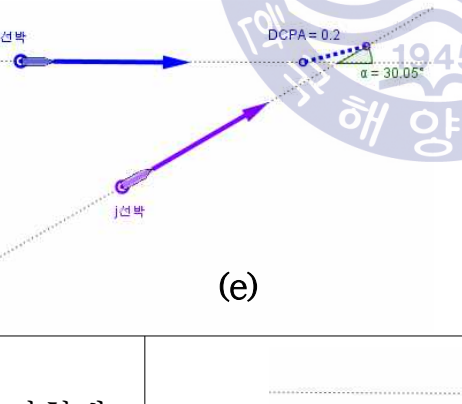
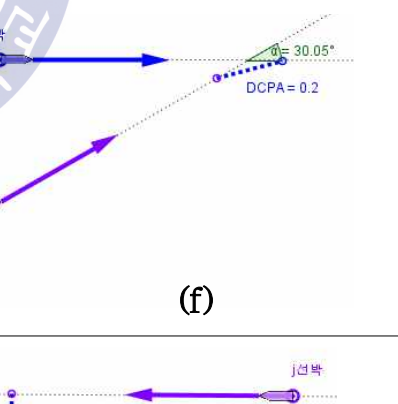
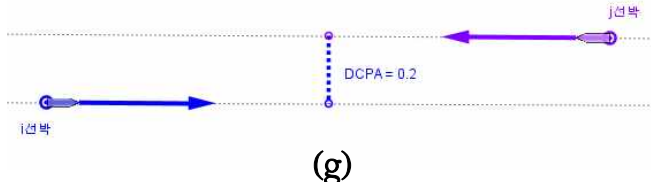
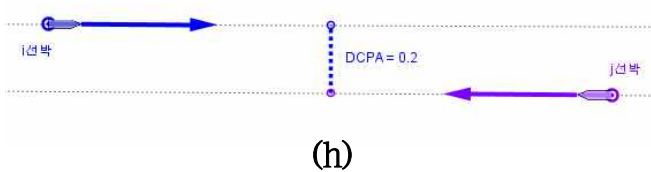
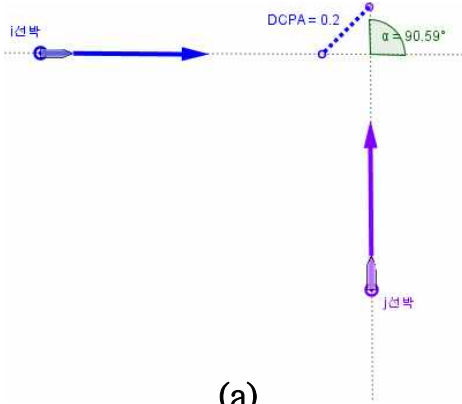
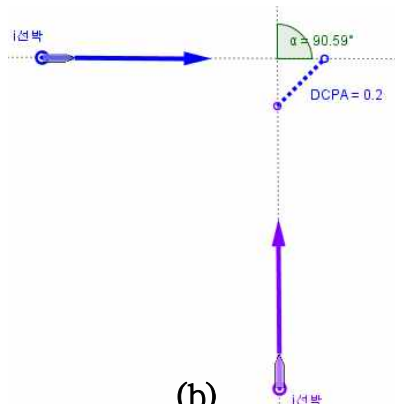
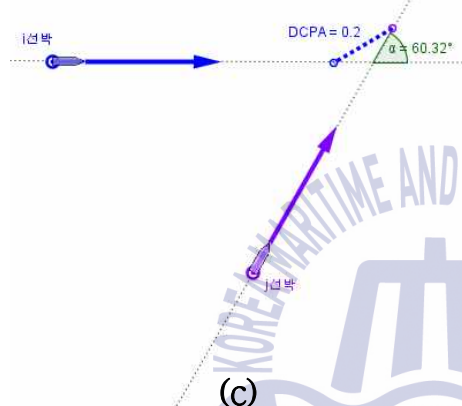
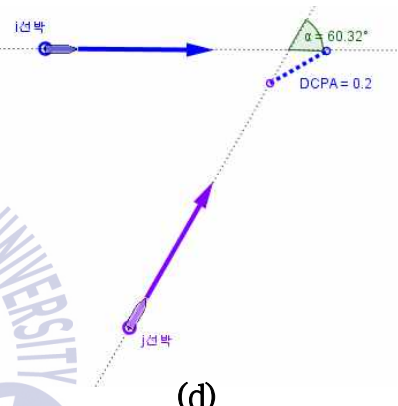
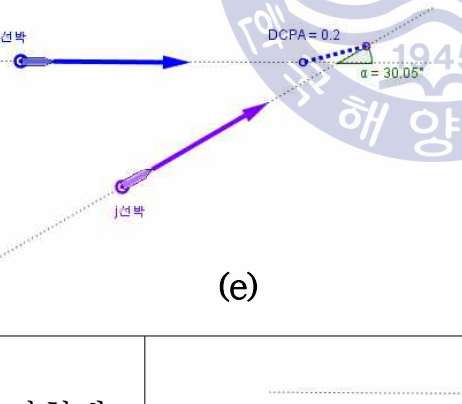
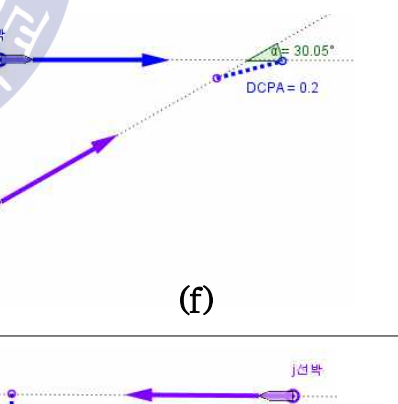
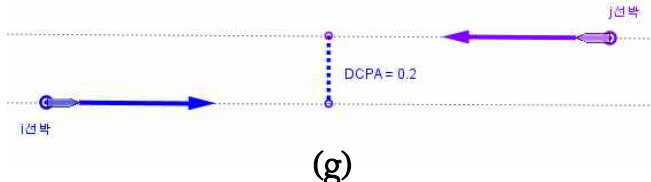
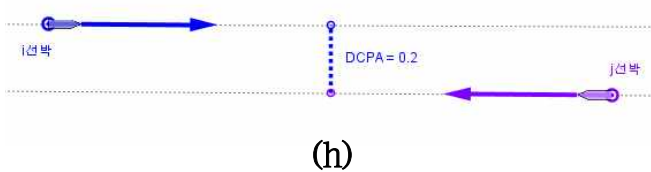
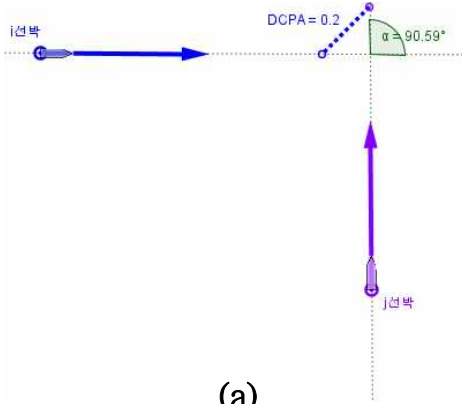
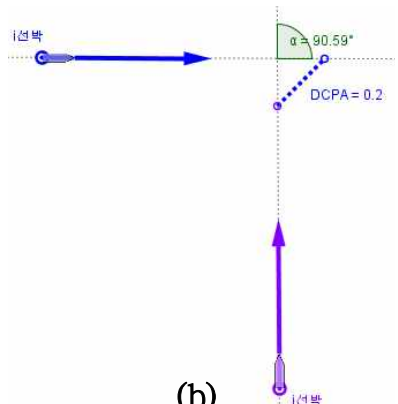
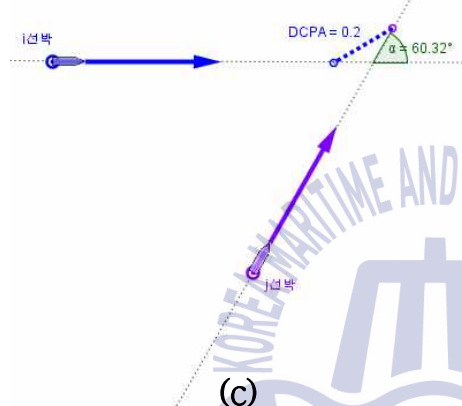
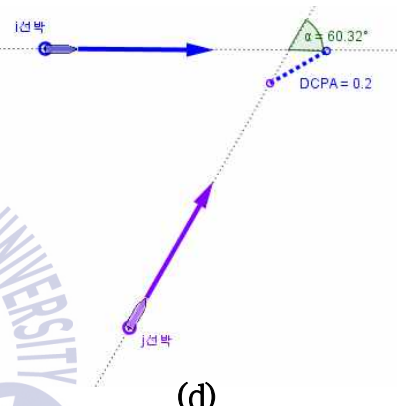
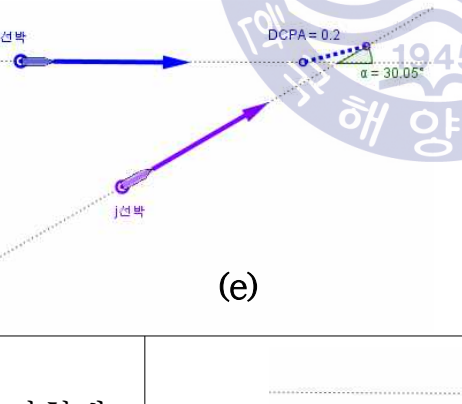
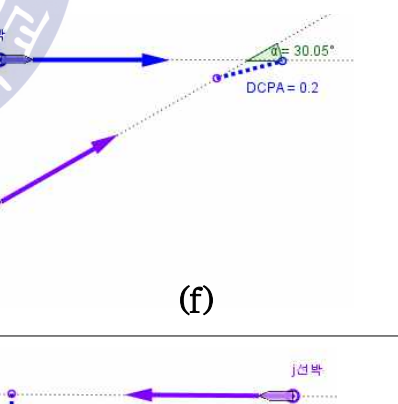
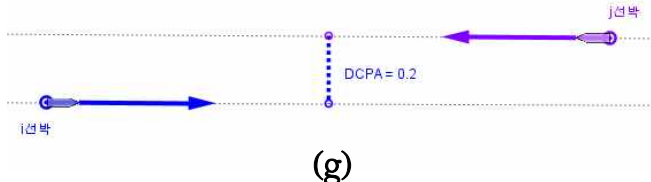
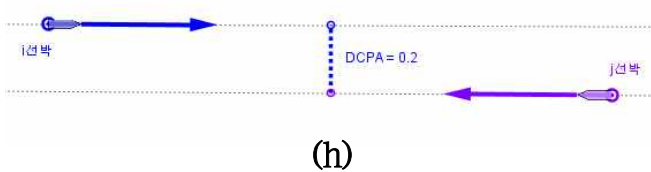
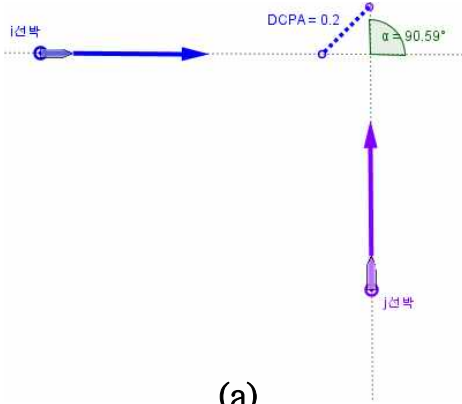
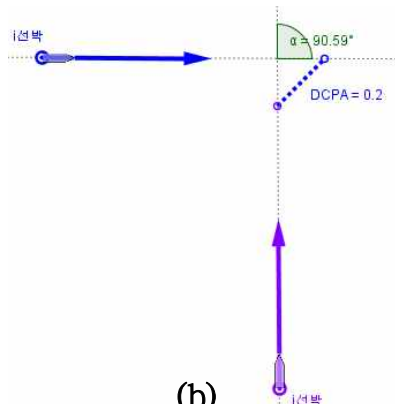
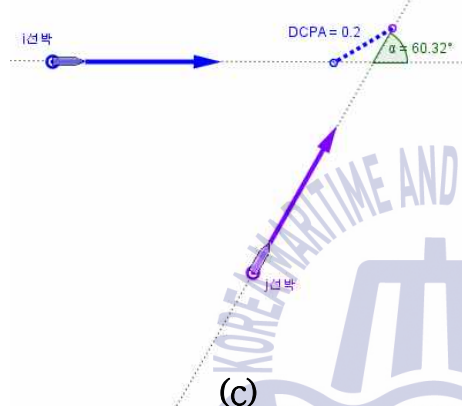
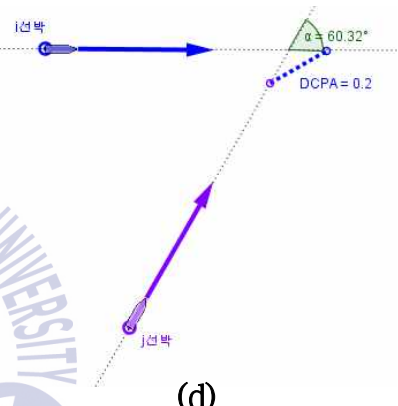
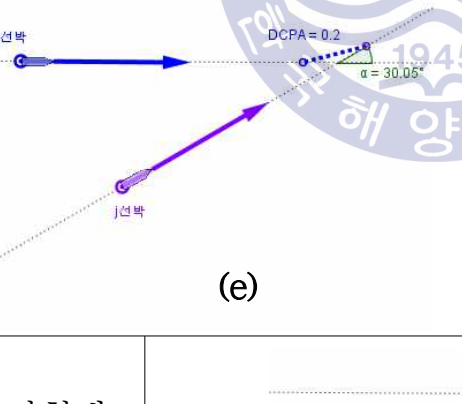
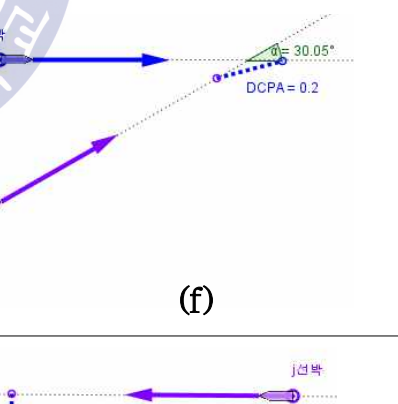
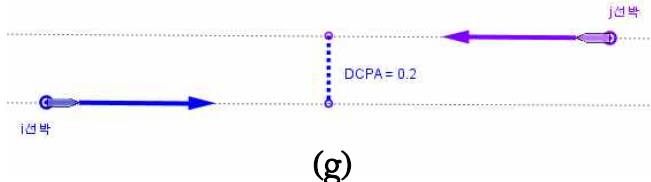
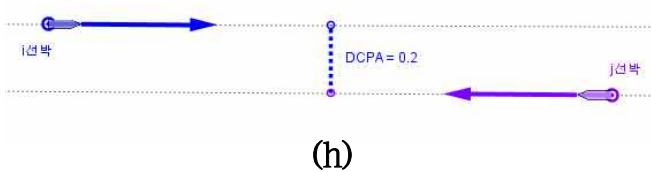
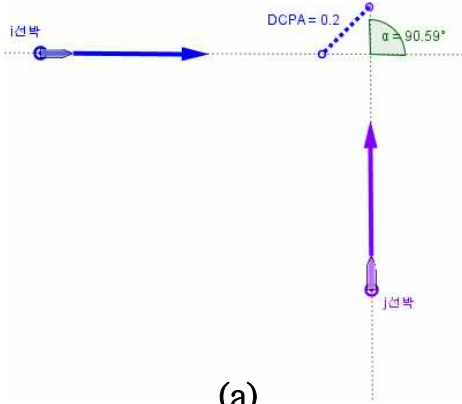
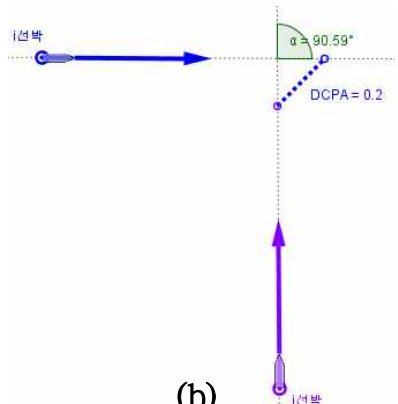
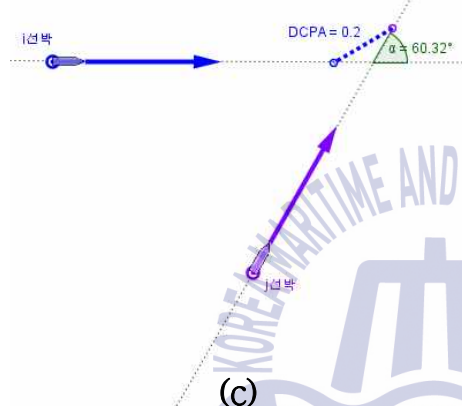
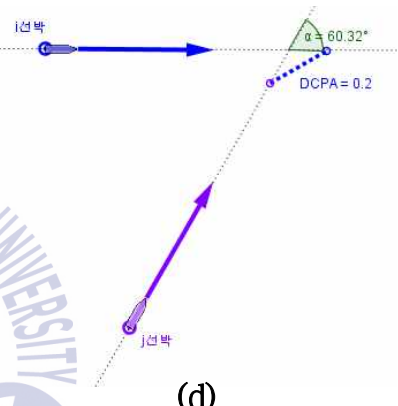
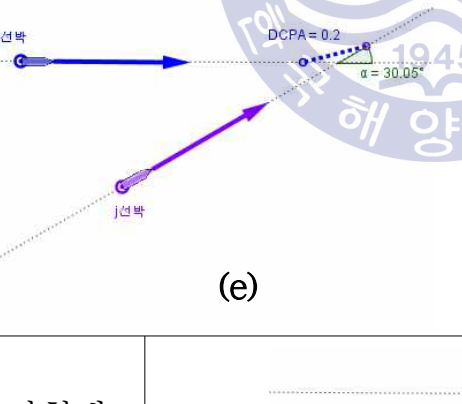
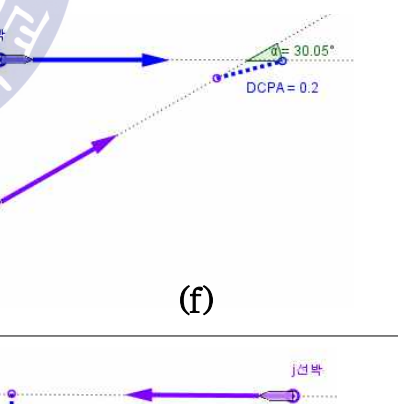
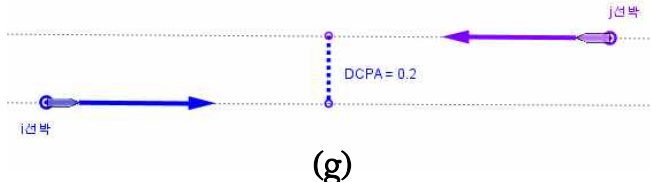
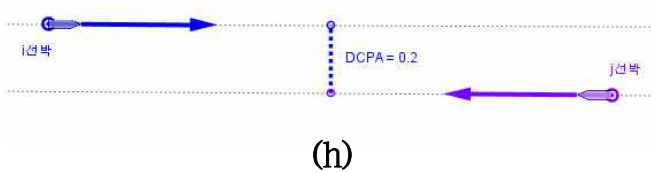
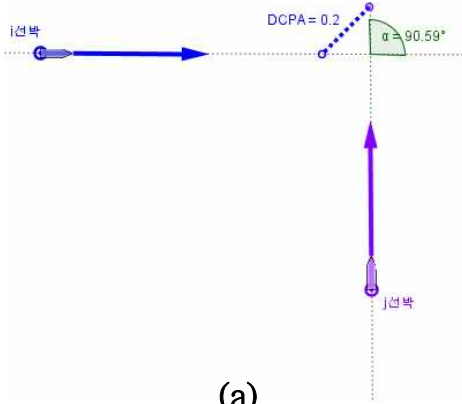
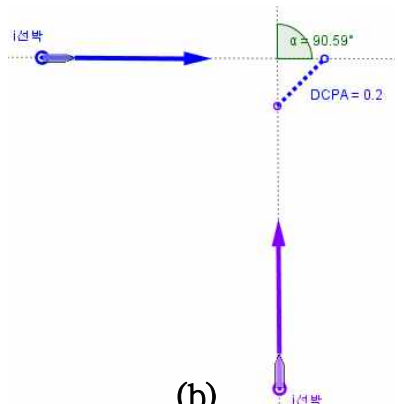
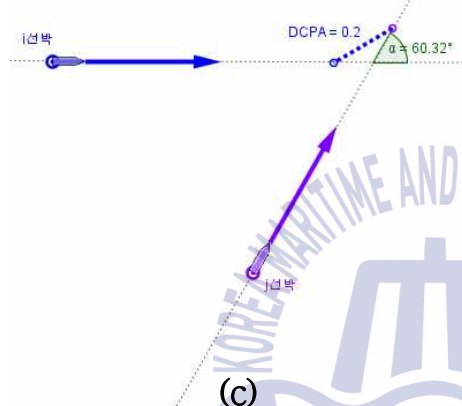
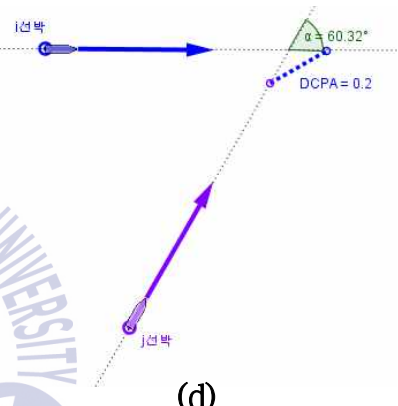
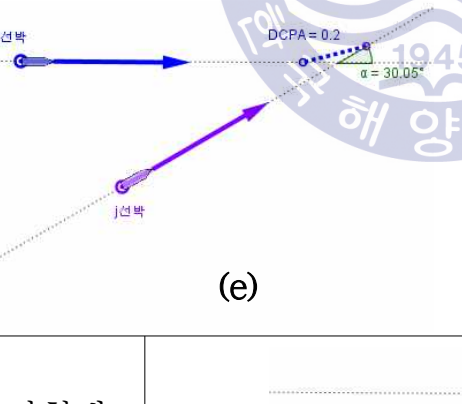
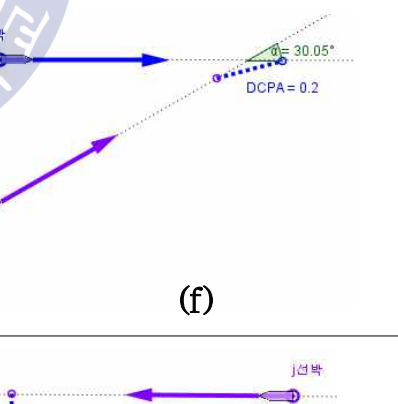
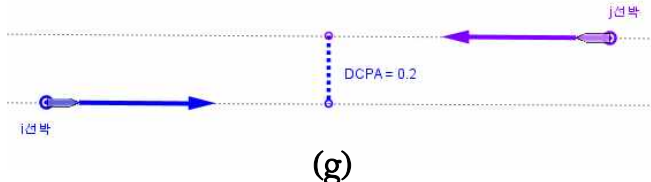
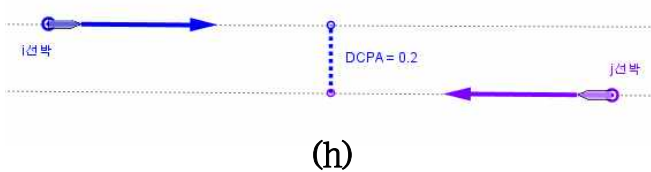
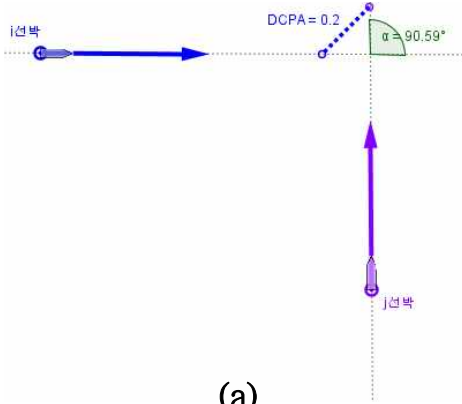
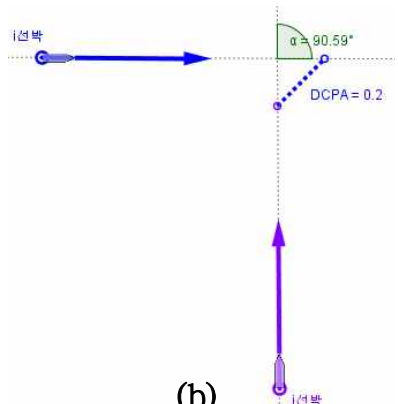
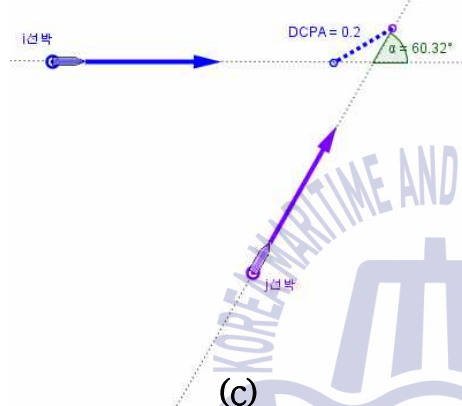
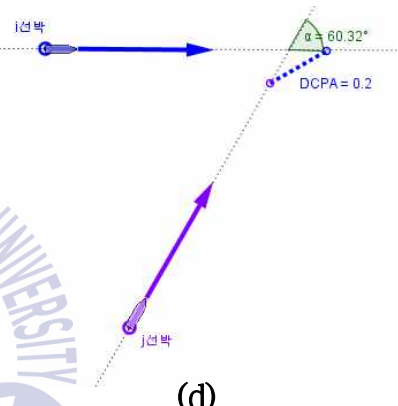
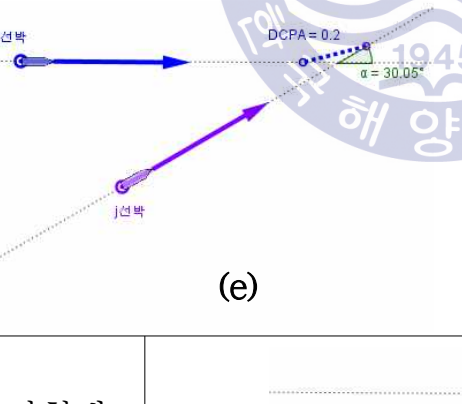
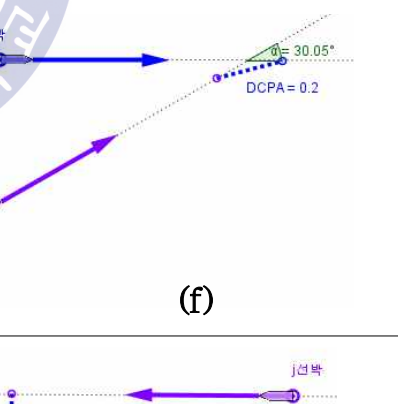
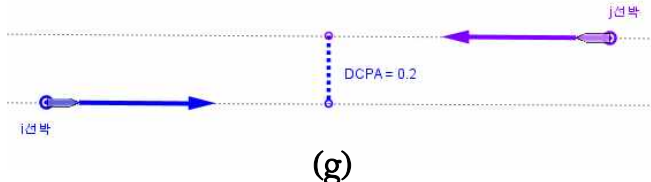
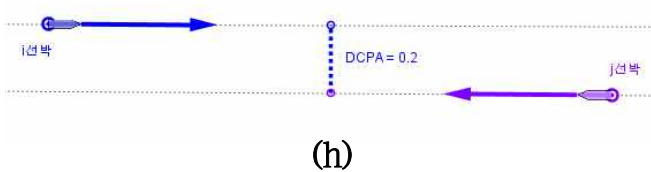
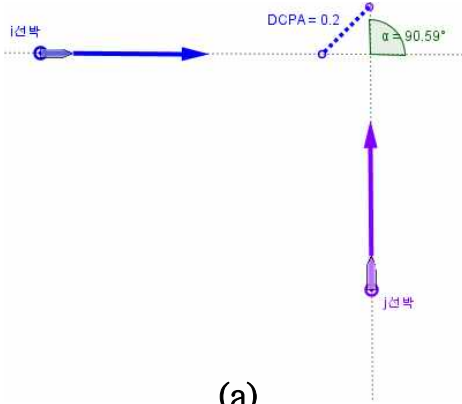
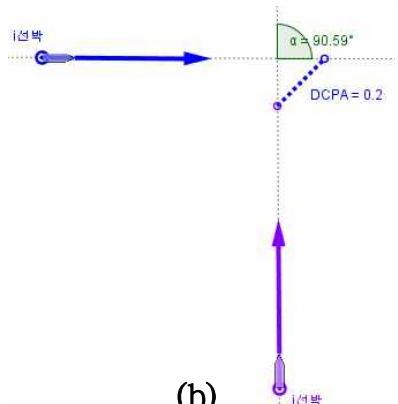
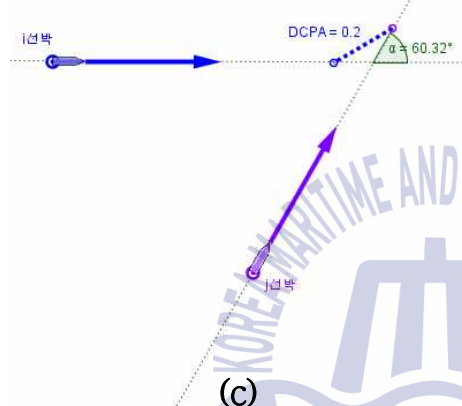
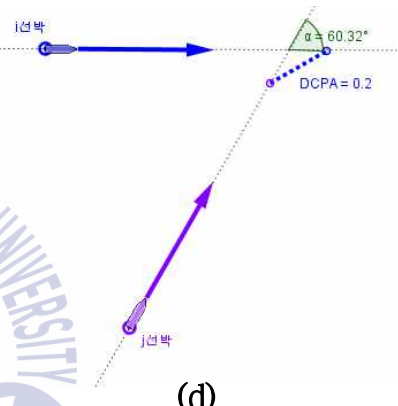
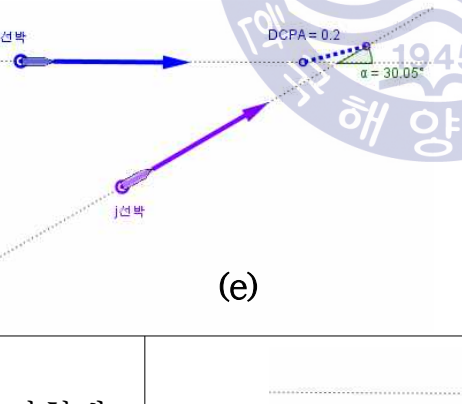
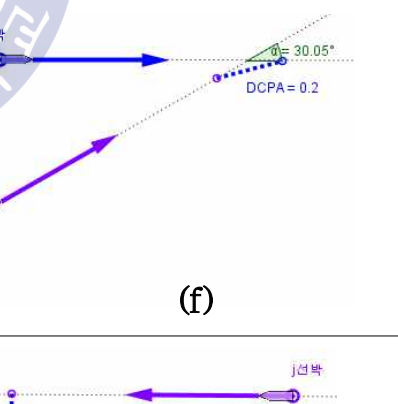
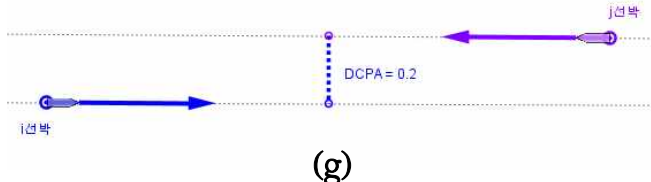
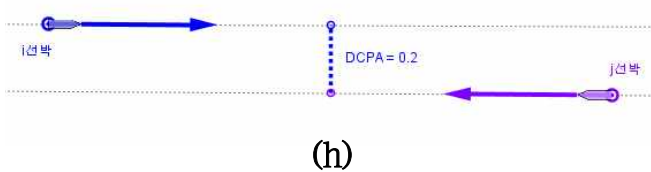
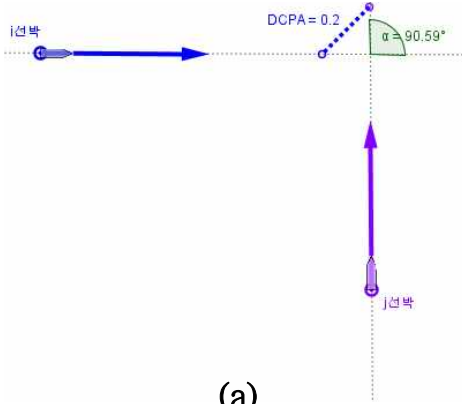
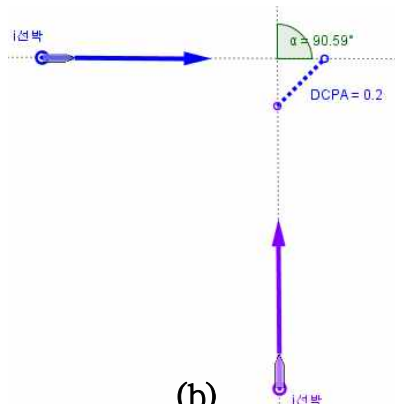
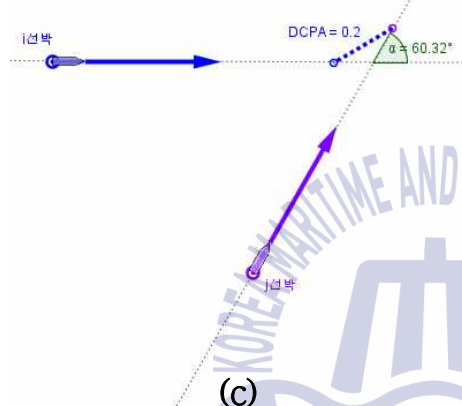
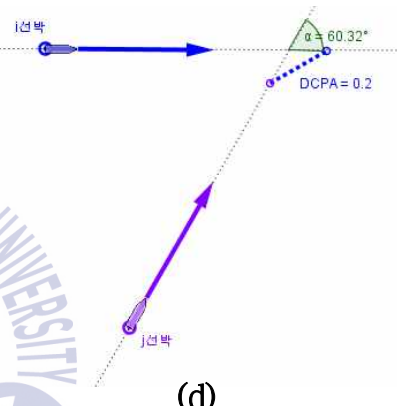
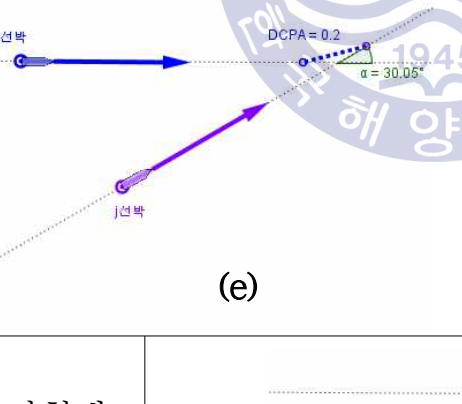
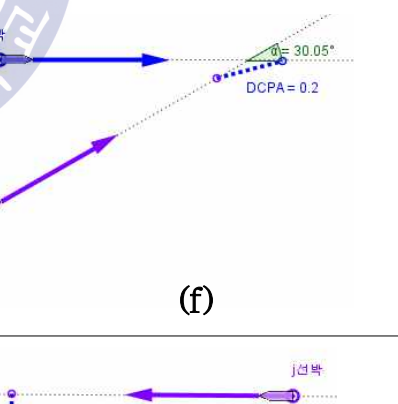
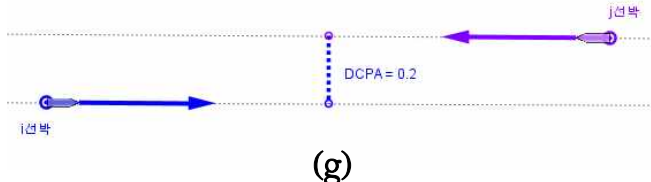
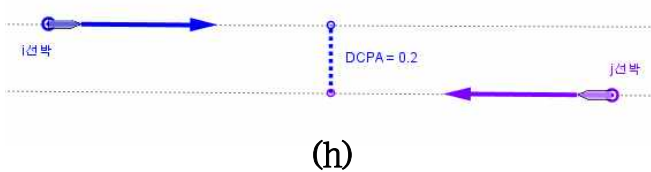
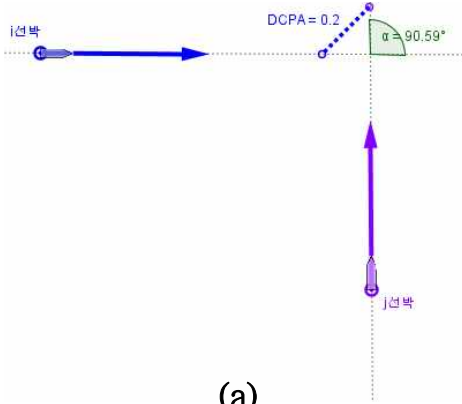
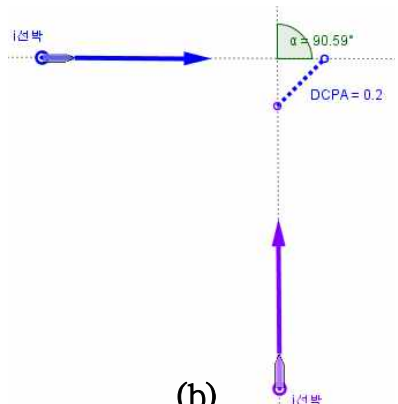
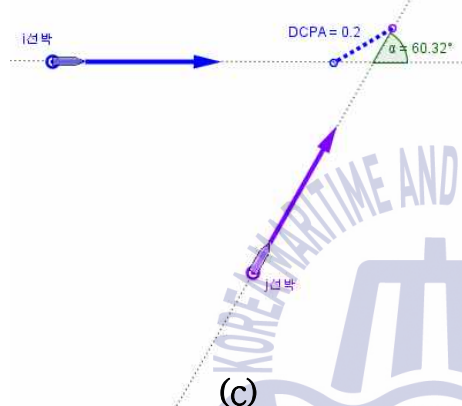
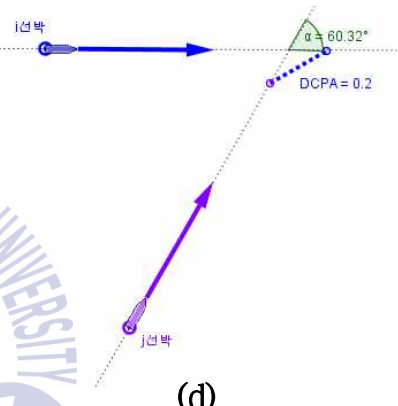
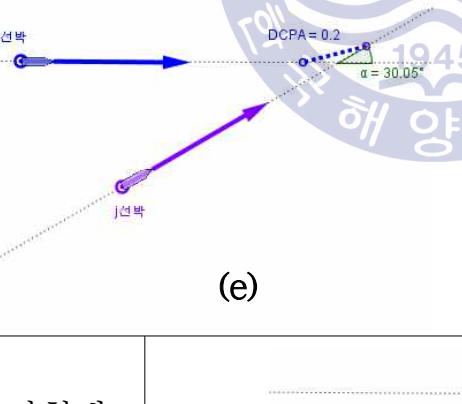
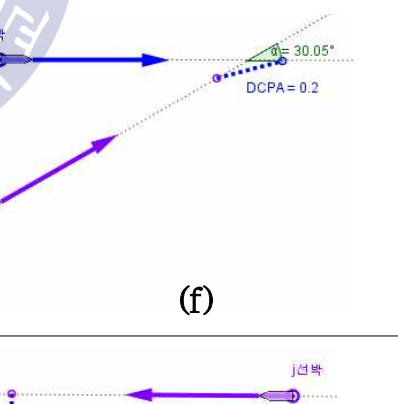
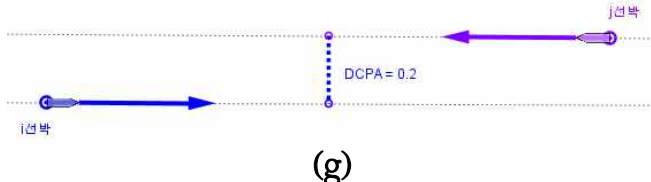
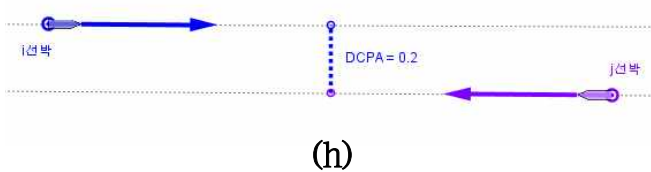
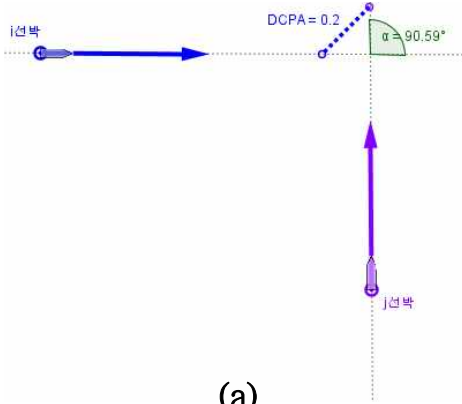
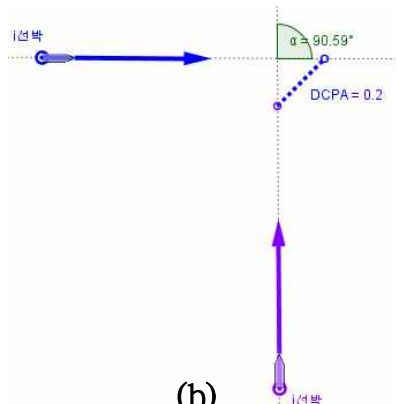
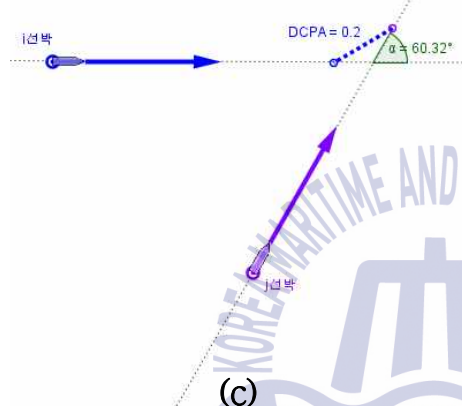
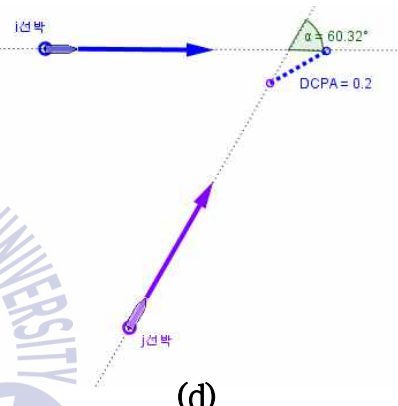
| 조우각 | 피항선이 유지선 선미 통과 | | 피항선이 유지선 선수 통과 | |
|--------|---|--|---|--|
| 090.5° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 030.0° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 090.5° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 030.0° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 090.5° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 030.0° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 090.5° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 030.0° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 090.5° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 030.0° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 090.5° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 030.0° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 090.5° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 030.0° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 090.5° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 030.0° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 090.5° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° |  <p>(e)</p> | |  <p>(f)</p> | |
| |  <p>(g)</p> | |  <p>(h)</p> | |
| 030.0° |  <p>(a)</p> | |  <p>(b)</p> | |
| |  <p>(c)</p> | |  <p>(d)</p> | |
| 060.3° | | | | |

Fig. 3.2 Encounter Situations when CPA and TCPA are same

3.2.2 CPA에서의 상대방위에 따른 선박 조우 상황 분석

앞 절에서 양 선박의 CPA와 TCPA가 같더라도 조우각과 유지선·피향선의 통과 의도에 따라 VTSO의 충돌 위험 판단 기준이 달라짐을 확인하였다.

이 절에서는 선박 조우 상황을 판단하기 위한 방법으로 TCPA가 0인 지점 즉, 두 선박이 CPA에 위치할 때, i 선박에서의 j 선박 상대방위를 θ_i , j 선박에서의 i 선박 상대방위를 θ_j 라 하고 θ_i 와 θ_j 의 변화에 따라 양 선박의 교행 관계를 비교하여 위험의 정도를 확인하고자 한다.

다음 Fig. 3.3부터 Fig. 3.7까지는 CPA와 TCPA가 모두 같은 상황에서 i 선박의 속력이 10노트일 때 CPA에서의 θ_i 와 θ_j 에 따른 j 선박의 횡단 방향과 속력이 어떻게 바뀌는지를 비교한 것이다.

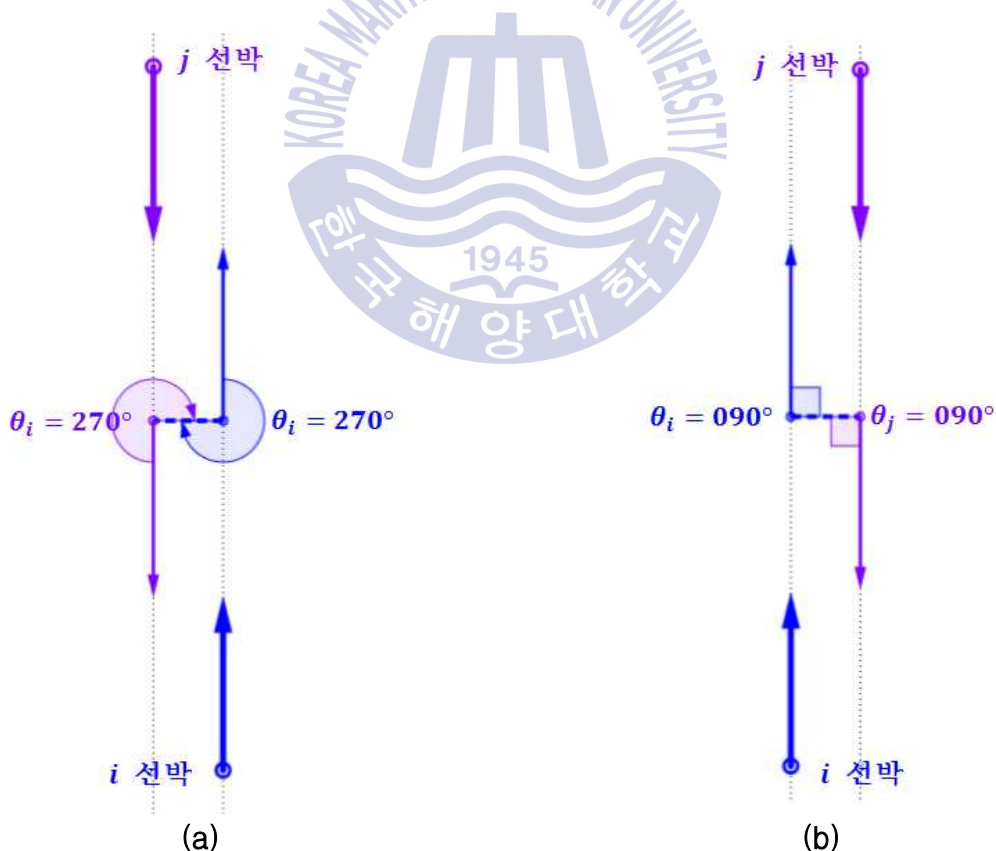
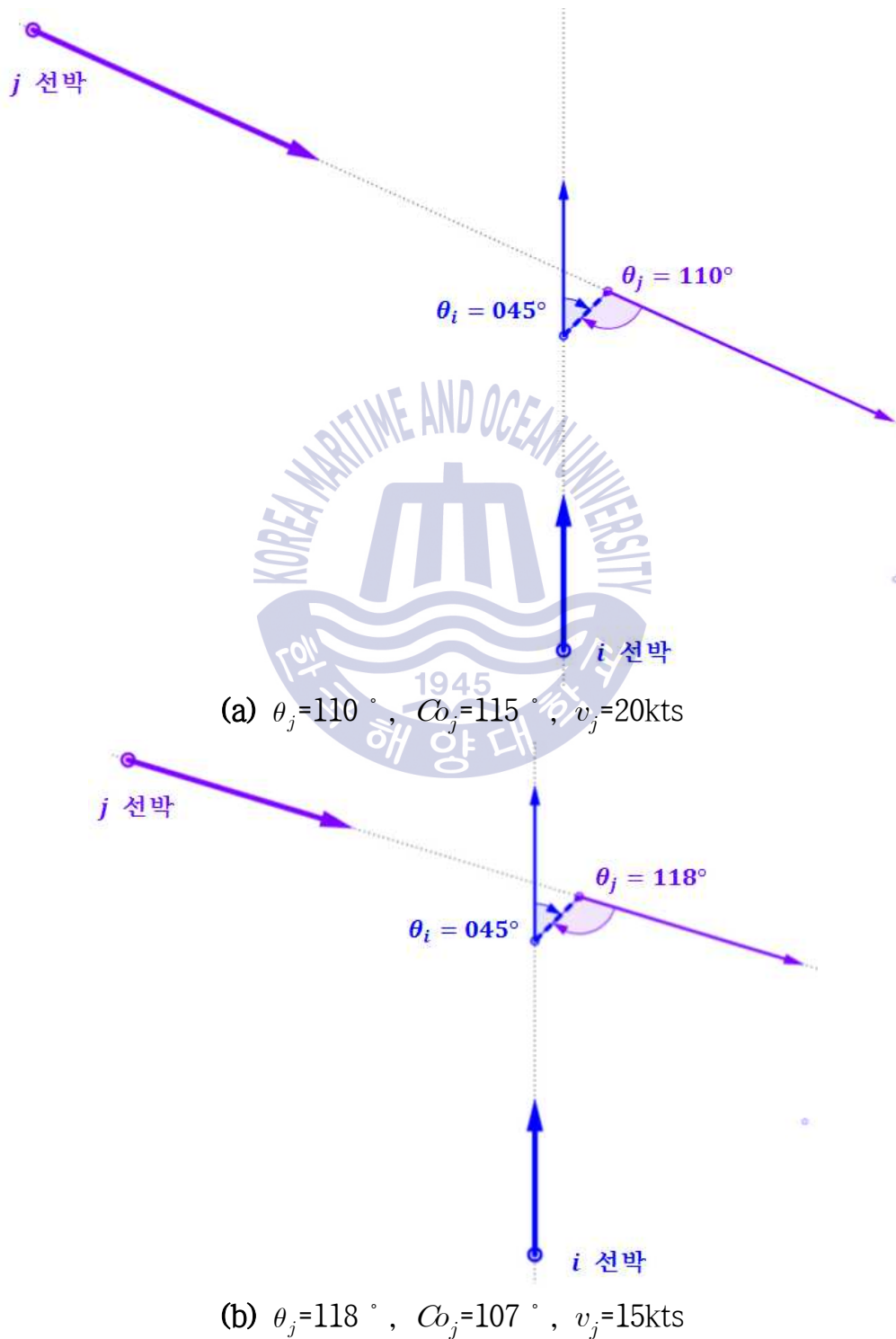
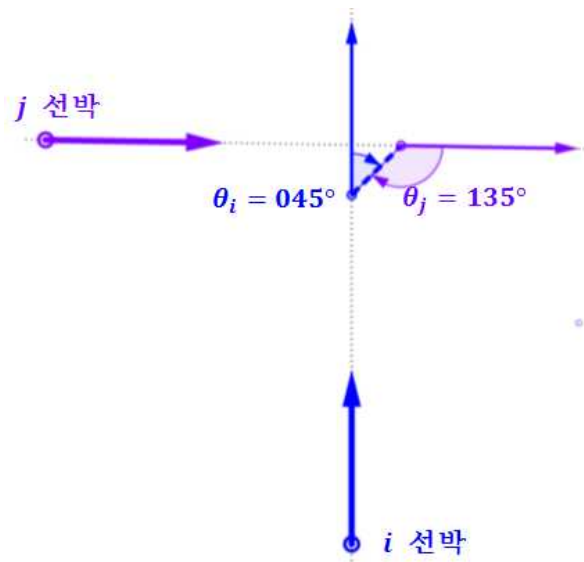


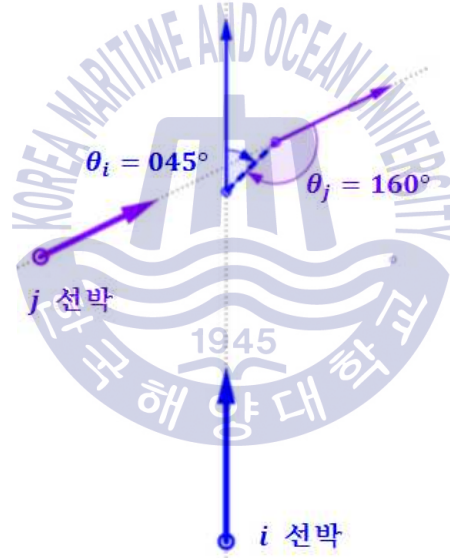
Fig. 3.3 Comparative of θ_i and θ_j

먼저 Fig. 3.3의 (a)는 양 선박이 좌현 대 좌현으로 통과하는 상황으로 CPA에서 θ_i 와 θ_j 는 각각 270도가 되고 (b)는 양 선박이 우현 대 우현으로 통과하는 상황으로 θ_i 와 θ_j 는 각각 090도가 된다.





(c) $\theta_j = 135^\circ$, $Co_j = 090^\circ$, $v_j = 10\text{kts}$

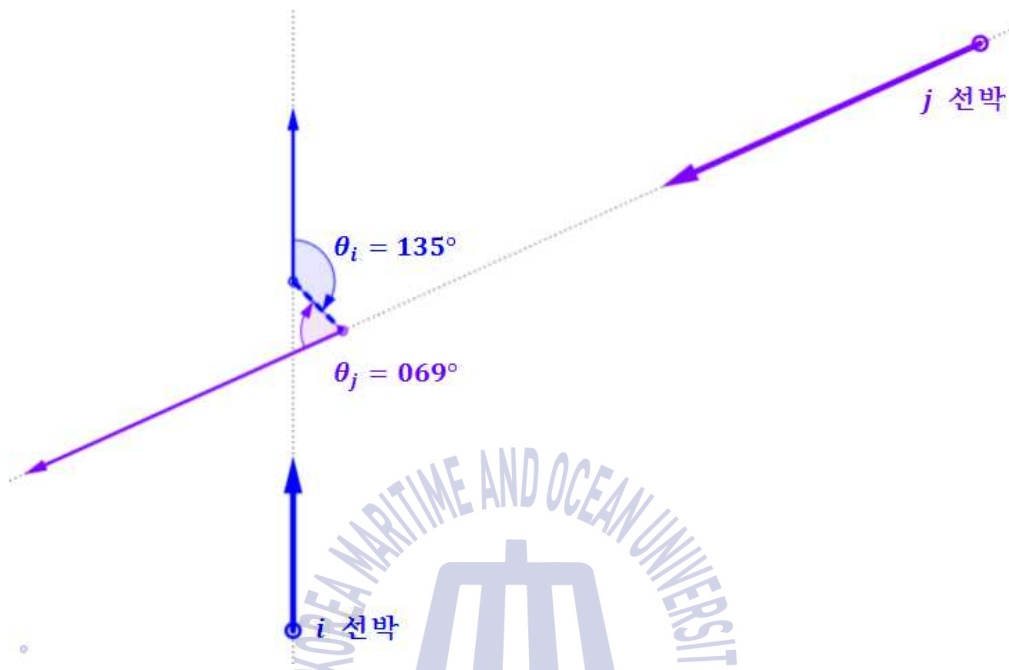


(d) $\theta_j = 160^\circ$, $Co_j = 065^\circ$, $v_j = 7.5\text{kts}$

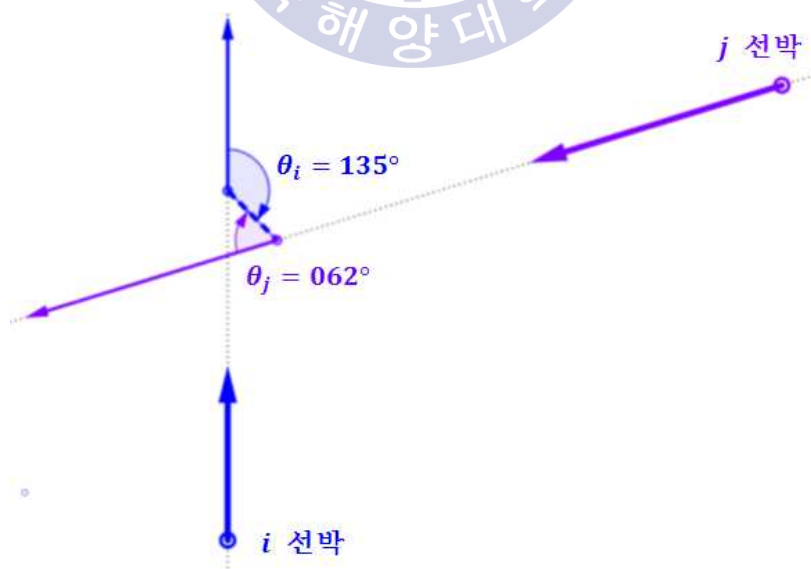
Fig. 3.4 Change of θ_j , Co_j and v_j when θ_i is 045°

Fig. 3.4는 θ_i 가 045도 일 때, θ_j 의 변화에 따른 j 선박의 침로와 속력, 그리고 조우각의 변화를 나타낸 것이다. (a)와 같이 θ_j 가 110도일 때 j 선박의 속력은 20노트로 i 선박의 2배가 되며 유지선(i 선박) 선수를 조우각 115도로 지나고, (b)는 θ_j 가 118도로 피항선(j 선박)이 15노트로 유지선(i 선박) 선수를 조우각 107도로 지난다. (c)와 같이 θ_j 가 135도가 되면 피항선(j 선박)이 유지선(i 선박)

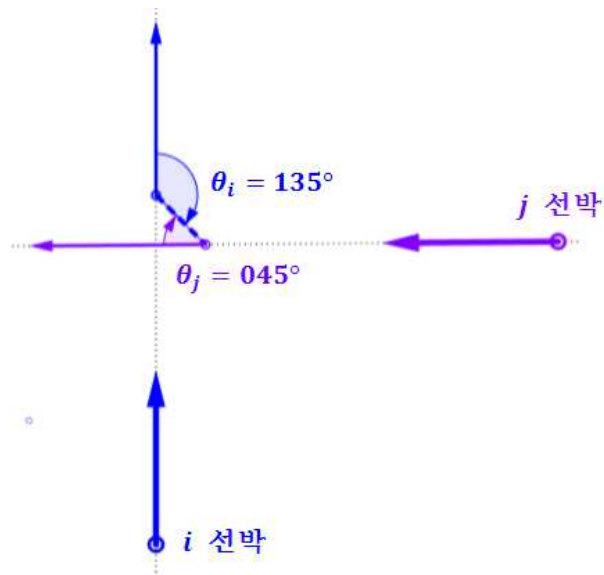
선수를 직각으로 교행하며 속력은 같아지고, (d)는 θ_j 가 160도로 j 선박이 7.5노트로 유지선(i 선박) 선수를 조우각 065도로 지난다.



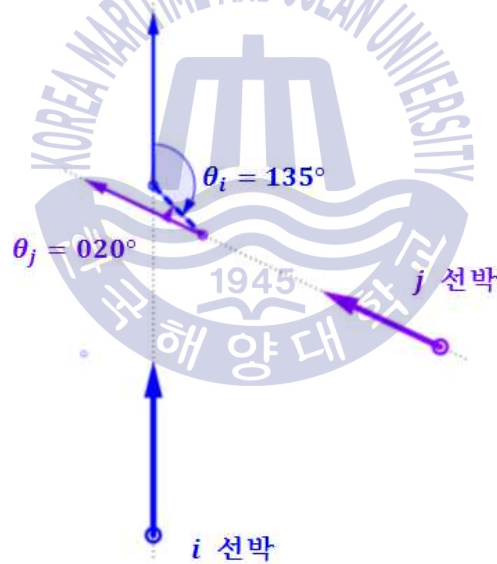
(a) $\theta_j=069^\circ$, $Co.j=245^\circ$, $v_j=20\text{kts}$



(b) $\theta_j=062^\circ$, $Co.j=253^\circ$, $v_j=15\text{kts}$



(c) $\theta_j=045^\circ$, $Co.j=270^\circ$, $v_j=10\text{kts}$

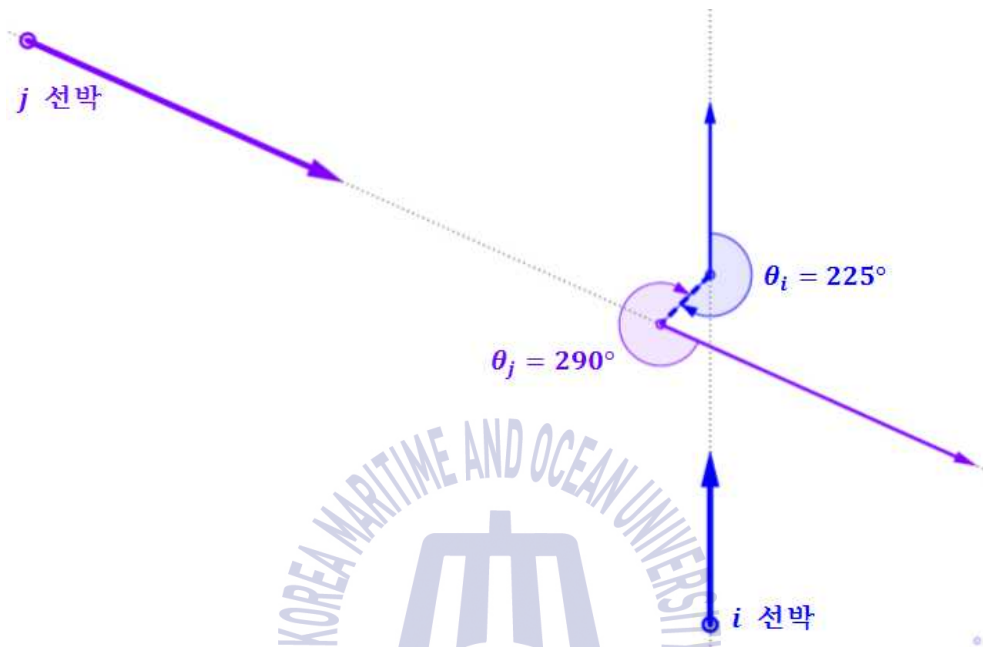


(d) $\theta_j=020^\circ$, $Co.j=295^\circ$, $v_j=7.5\text{kts}$

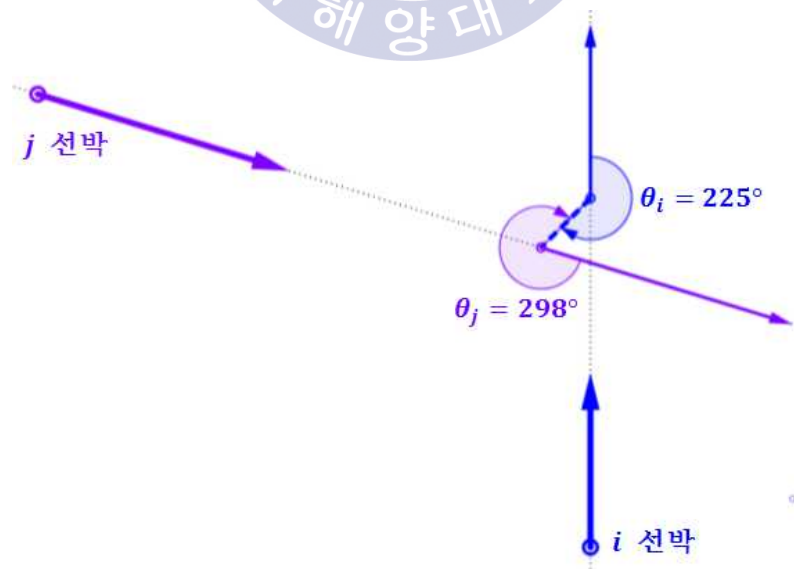
Fig. 3.5 Change of θ_j , $Co.j$ and v_j when θ_i is 135°

Fig. 3.5는 θ_i 가 135도 일 때, θ_j 의 변화에 따른 j 선박의 침로와 속력, 조우각의 변화를 나타낸 것이다. (a)와 같이 θ_j 가 069도일 때 j 선박의 속력은 20노트로 i 선박의 2배가 되며 유지선(j 선박) 선수를 조우각 115도로 지나고, (b)는 θ_j 가 062도로 피항선(i 선박)이 유지선(j 선박) 선수를 조우각 107도로 지난다.

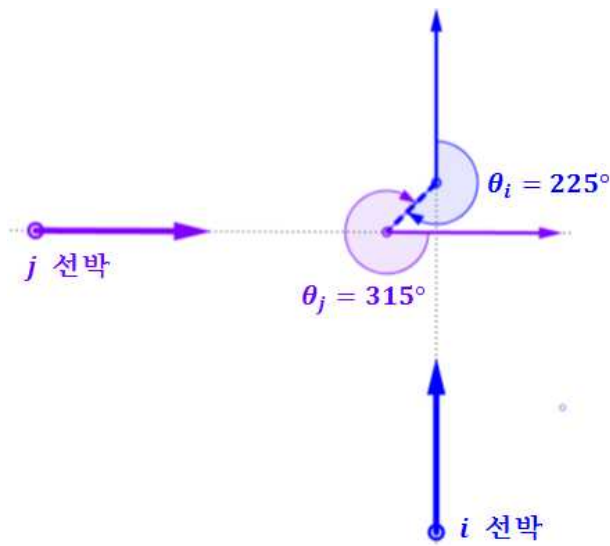
(c)와 같이 θ_j 가 045도가 되면 피항선(i 선박)이 유지선(j 선박) 선수를 직각으로 교행하며 속력은 같아지고, (d)는 θ_j 가 020도로 j 선박이 7.5노트로 유지선(j 선박) 선수를 조우각 065도로 지난다.



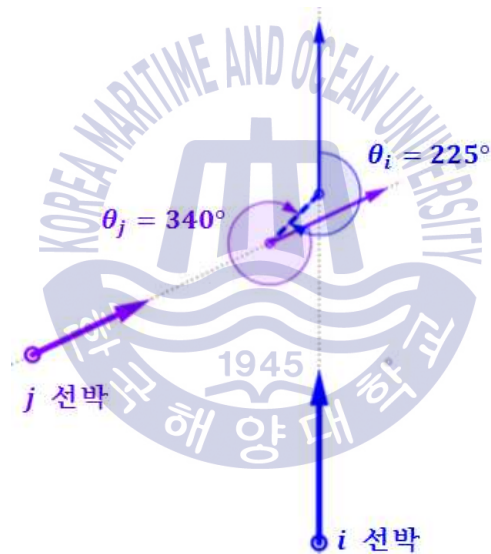
(a) $\theta_j=290^\circ$, $Co.j=115^\circ$, $v_j=20\text{kts}$



(b) $\theta_j=298^\circ$, $Co.j=107^\circ$, $v_j=15\text{kts}$



(c) $\theta_j = 315^\circ$, $Co.j = 090^\circ$, $v_j = 10\text{kts}$

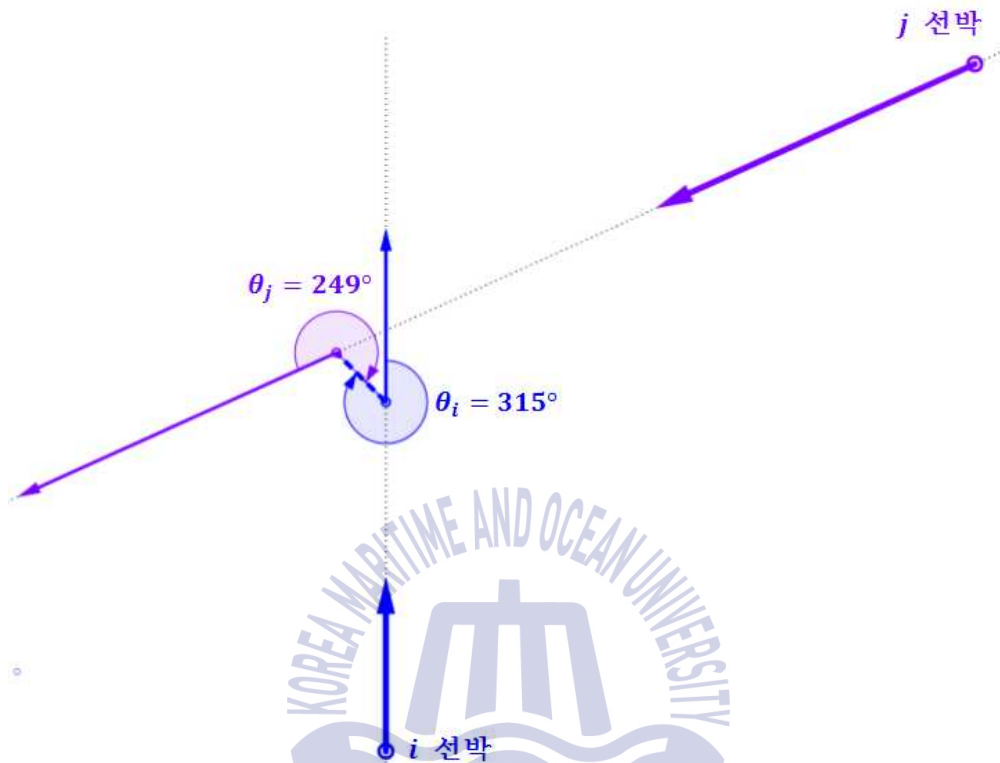


(d) $\theta_j = 340^\circ$, $Co.j = 065^\circ$, $v_j = 7.5\text{kts}$

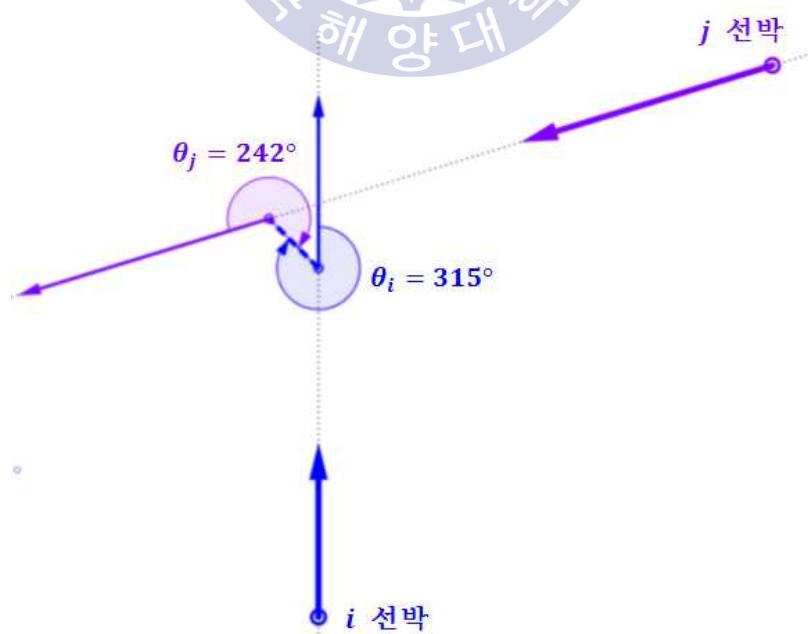
Fig. 3.6 Change of θ_j , $Co.j$ and v_j when θ_i is 225°

Fig. 3.6은 θ_i 가 225도 일 때, θ_j 의 변화에 따른 j 선박의 침로와 속력, 조우각의 변화를 나타낸 것이다. (a)와 같이 θ_j 가 290도일 때 j 선박의 속력은 20노트로 i 선박의 2배가 되며 유지선(i 선박) 선미를 조우각 115도로 지나고, (b)는 θ_j 가 298도로 피항선(j 선박)이 15노트로 유지선(i 선박) 선미를 조우각 107도로 지난다. (c)와 같이 θ_j 가 315도가 되면 피항선(j 선박)이 유지선(i 선박) 선미를

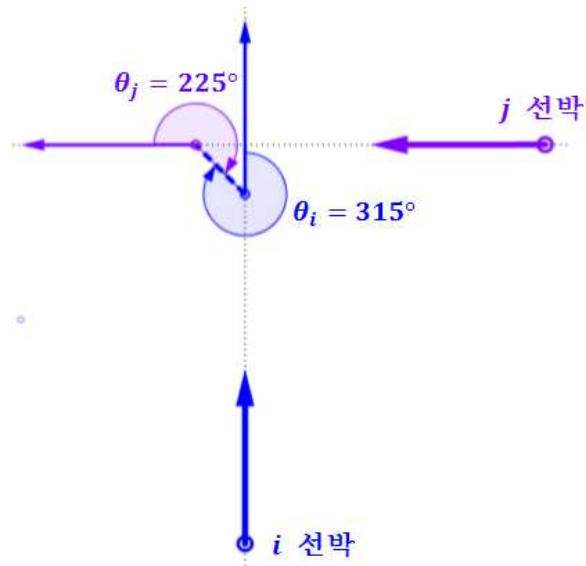
직각으로 교행하며 속력은 같아지고, (d)는 θ_j 가 340도로 j 선박이 7.5노트로 유
지선(i 선박) 선미를 조우각 065도로 지난다.



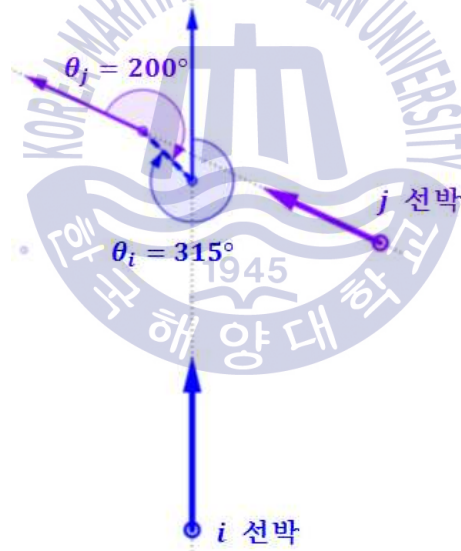
(a) $\theta_j=249^\circ$, $Co.j=245^\circ$, $v_j=20\text{kts}$



(b) $\theta_j=242^\circ$, $Co.j=253^\circ$, $v_j=15\text{kts}$



(c) $\theta_j = 225^\circ$, $Co.j = 270^\circ$, $v_j = 10\text{kts}$



(d) $\theta_j = 200^\circ$, $Co.j = 295^\circ$, $v_j = 7.5\text{kts}$

Fig. 3.7 Change of θ_j , $Co.j$ and v_j when θ_i is 315°

Fig. 3.7은 θ_i 가 315도 일 때, θ_j 의 변화에 따른 j 선박의 침로와 속력, 조우각의 변화를 나타낸 것이다. (a)와 같이 θ_j 가 249도일 때 j 선박의 속력은 20노트로 i 선박의 2배가 되며 유지선(j 선박) 선미를 조우각 115도로 지나고, (b)는 θ_j 가 242도로 피향선(i 선박)이 유지선(j 선박) 선미를 조우각 107도로 지난다.

(c)와 같이 θ_j 가 225도가 되면 피항선(i 선박)이 유지선(j 선박) 선미를 직각으로 교행하며 속력은 같아지고, (d)는 θ_j 가 200도로 j 선박이 7.5노트로 유지선(j 선박) 선미를 조우각 065도로 지난다.

Fig. 3.4와 Fig. 3.6은 i 선박이 유지선, j 선박이 피항선으로 양 선박의 조우각과 j 선박의 속력과 침로가 동일하다. 하지만 Fig. 3.4는 피항선이 유지선의 선수를 지나고 Fig. 3.6은 피항선이 유지선의 선미를 지나므로 Fig. 3.4가 Fig. 3.6보다 더 위험한 상황으로 보인다. 즉 θ_i 가 045도(우현선수방향) 일 때가 θ_i 가 225도(좌현선미방향)보다 더 위험한 조우 상황이 전개됨을 알 수 있다.

마찬가지로 Fig. 3.5와 Fig. 3.7은 i 선박이 피항선, j 선박이 유지선이며 i 선박과 교차하는 j 선박의 속력과 침로가 동일하다. 하지만 Fig. 3.5는 피항선이 유지선의 선수를 지나고 Fig. 3.7은 피항선이 유지선의 선미를 지나므로 Fig. 3.5가 Fig. 3.7보다 더 위험한 상황으로 보인다. 즉 θ_i 가 135도(우현선미방향) 일 때가 θ_i 가 315도(좌현선수방향)보다 더 위험한 조우 상황이 전개된다.

Fig. 3.4 (c)와 Fig. 3.5 (c)는 θ_i 와 θ_j 가 045도, 135도로 각 선박의 입장은 유지선에서 피항선으로 서로 바뀌지만, VTS 관점에서는 같은 속력을 가진 두 선박이 직각으로 교행하며 피항선이 유지선 선수를 지나는 조우 상황이 되고, Fig. 3.6 (c)와 Fig. 3.7 (c)는 θ_i 와 θ_j 가 225도, 315도로 같은 속력을 가진 두 선박이 직각으로 교행하며 피항선이 유지선 선미를 지나 Fig. 3.4 (c)와 Fig. 3.5 (c)보다 더 안전한 조우 상황이 전개됨을 알 수 있다.

이와 같이 VTS 관점에서 양 선박의 조우 상황은 CPA에서의 θ_i 와 θ_j 에 따라 추월 상태인지, 마주침 상태에서 좌현 대 좌현 또는 우현 대 우현으로 통과하는지, 횡단 상태에서 피항선이 유지선 선수 또는 선미를 지나는지, 양 선박의 조우각과 속력차는 어떠한지를 알 수 있다.

또한 선박 운항자는 자선을 중심으로 타선박과의 관계를 고려하지만 VTSO는 양 선박을 동시에 모니터링하며 선박간의 조우관계를 고려하여 위험 여부를 판단하므로 Fig. 3.8과 같이 선박과 VTS의 관점이 다름을 알 수 있다.



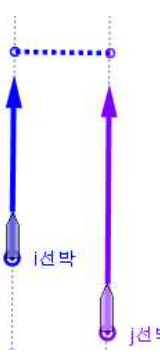
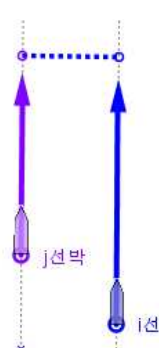
| Encountering Situation |  |  |  |  |
|------------------------|---|---|--|---|
| i | Exist a vessel ahead | No vessel except astern | Exist an overtaking vessel on stbd side | Exist a vessel on port side |
| j | No vessel except astern | Exist a vessel ahead | Exist a vessel on port side | Exist an overtaking vessel on stbd side |
| VTS | Same situation | | Same situation | |

Fig 3.8 Comparison of VTS' s and Vessel' s viewpoints

3.2.3 CPA에서의 상대방위에 따른 위험지수

선박 운항자의 주관적 위험도 평가 기초 모형에서 본선을 기준으로 선박의 조우 관계에 따른 주관적 위험도를 분석한 결과, 조우각이 135° , 090° , 045° , 추월 순으로 위험도가 높은 것으로 나타났고 타 선박과의 속력 분석에서 속력이 비슷한 경우가 가장 큰 주관적 위험도를 나타냈다(김종성 외, 2011).

COLREG에서는 상호 시계 내에 있을 때의 항법으로 Overtaking 상태에서 추월선은 추월당하고 있는 선박을 완전히 추월하거나 그 선박에서 충분히 멀어질 때까지 그 선박의 진로를 피하여야 하며, Head-on 상태에서 충돌의 위험이 있을 때 서로 다른 선박의 좌현 쪽을 지날 수 있도록 침로를 우현 쪽으로 변침하여야 한다고

하고 있다.

또한, Crossing 상태에서 충돌의 위험이 있을 때 다른 선박을 우현에 두고 있는 선박이 그 다른 선박의 진로를 피하여야 하며 이때 그 다른 선박의 선수 방향을 횡단하여서는 아니 되며, 유지선은 부득한 때 외에는 자기 선박의 좌현 쪽에 있는 선박을 향하여 침로를 왼쪽으로 변경하여서는 아니 된다고 하고 있다.

따라서 선박 간 충돌 위험이 있을 때 선박의 속력이 비슷하고 조우각이 본선 선수(000°)에서 그 각이 커질수록 선박 운항자의 주관적 위험도가 높아지며, COLREG의 항법에 따르면 Head-on 상태에서는 좌현 대 좌현으로 통과하고 Crossing 상태에서는 피항선이 유지선의 선수 방향으로 횡단하지 아니하고 유지선의 진로를 피하여 항해하는 것이 안전하다고 판단할 수 있다.

이러한 판단 기준을 바탕으로 CPA와 TPCA가 같을 때, CPA에서의 θ_i 와 θ_j 에 따른 양 선박의 조우 패턴과 속력비, 조우각을 비교하면 Table. 3.1과 같고, 조우각은 COLREG에 따라 Fig. 3.9와 같이 분류하였다.

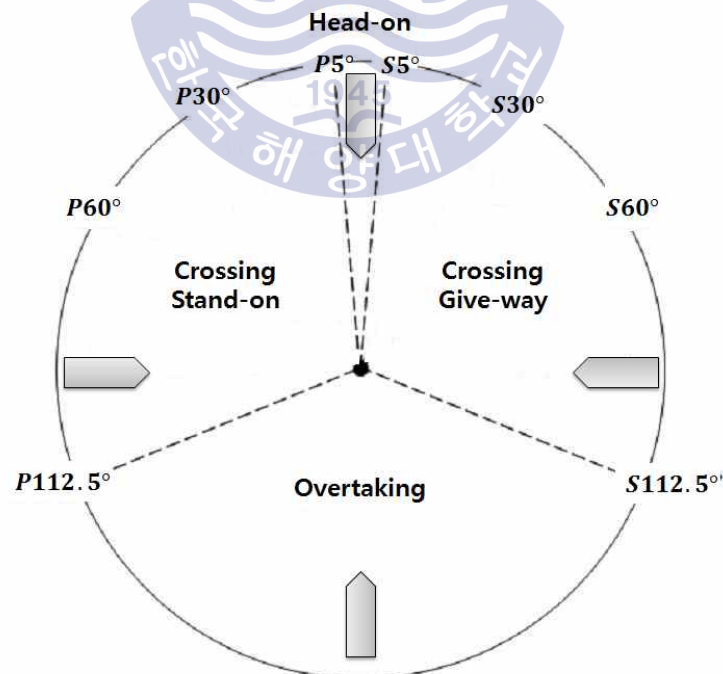


Fig 3.9 Encounter angle classification due to Head-on, Crossing and Overtaking situation

Table 3.1 Patterns of Encounter situation due to θ_i

| θ_i | θ_j | Patterns of Encountering situation | 속력비 (i : j) | 조우각 |
|------------|------------|------------------------------------|----------------|-------|
| 000 | 150 | 타선박(피항선)이 좌현에서 선수로 횡단 | 1 : 1.1 | P210° |
| | 210 | 타선박(유지선)이 우현에서 선수로 횡단 | 1 : 1.1 | S150° |
| 030 | 150 | 타선박(피항선)이 좌현에서 선수로 횡단 | 1 : 1 | P120° |
| | 180 | 타선박(피추월선)이 좌현선수에서 선수로 지남 | 1 : 0.9 | P150° |
| | 240 | 타선박(추월선)이 우현선미에서 선수로 추월 | 1 : 1.7 | S150° |
| 060 | 120 | 타선박(피항선)이 좌현에서 선수로 횡단 | 1 : 1 | P060° |
| | 150 | | 1 : 0.6 | P090° |
| | 180 | | 1 : 0.5 | P120° |
| | 210 | 타선박(피추월선)이 좌현선수에서 선수로 지남 | 1 : 0.6 | P150° |
| | 250 | 타선박(추월선)이 우현선미에서 선수로 추월 | 1 : 1.5 | S170° |
| 090 | 090 | 우현 대 우현 통과 | | 000° |
| 120 | 060 | 타선박(유지선)이 우현에서 선미로 통과 | 1 : 1 | S060° |
| | 030 | | 1 : 0.6 | S090° |
| | 000 | | 1 : 0.5 | S120° |
| | 330 | 타선박(피추월선)이 우현선수에서 선미로 지남 | 1 : 0.6 | S150° |
| 150 | 060 | 타선박(유지선)이 우현에서 선미로 통과 | 1 : 1.7 | S090° |
| | 030 | | 1 : 1 | S120° |
| | 000 | 타선박(피추월선)이 우현에서 선미로 지남 | 1 : 0.9 | S150° |
| | 300 | 타선박(추월선)이 좌현선미에서 선미로 추월 | 1 : 1.7 | P150° |

| θ_i | θ_j | Patterns of Encountering situation | 속력비 (i : j) | 조우각 |
|------------|------------|------------------------------------|----------------|-------|
| 180 | 060 | 타선박(추월선)이 우현선미에서 선미로 추월 | 1 : 2 | S120° |
| | 030 | | 1 : 1.1 | S150° |
| | 330 | 타선박(피항선)이 좌현선미에서 선미로 지남 | 1 : 1.1 | P150° |
| | 300 | | 1 : 2 | P120° |
| 330 | 240 | 타선박(유지선)이 우현에서 선수로 횡단 | 1 : 1.7 | S090° |
| | 210 | | 1 : 1 | S120° |
| | 180 | 타선박(피추월선)이 우현선수에서 선수로 지남 | 1 : 0.9 | S150° |
| | 120 | 타선박(추월선)이 좌현선미에서 선수로 추월 | 1 : 1.7 | P150° |
| 300 | 240 | 타선박(유지선)이 우현에서 선수로 횡단 | 1 : 1 | S060° |
| | 210 | | 1 : 0.6 | S090° |
| | 180 | | 1 : 0.5 | S120° |
| | 150 | 타선박(피추월선)이 우현선수에서 선수로 지남 | 1 : 0.6 | S150° |
| | 110 | 타선박(추월선)이 좌현선미에서 선수로 추월 | 1 : 1.5 | S170° |
| 270 | 270 | 좌현 대 좌현 통과 | | 000° |
| 240 | 300 | 타선박(피항선)이 좌현선수에서 선미로 지남 | 1 : 1 | P060° |
| | 330 | | 1 : 0.6 | P090° |
| | 360 | | 1 : 0.5 | P120° |
| | 030 | 타선박(피추월선)이 좌현선수에서 선미로 지남 | 1 : 0.6 | P150° |
| 210 | 300 | 타선박(피항선)이 좌현선수에서 선미로 지남 | 1 : 1.7 | P090° |
| | 330 | | 1 : 1 | P120° |
| | 360 | 타선박(피항선)이 좌현에서 선미로 지남 | 1 : 0.9 | P150° |
| | 060 | 타선박(추월선)이 우현선미에서 선미로 추월 | 1 : 1.7 | S150° |

Table. 3.1에서 θ_i 에 따른 선박의 조우 상황을 살펴보면, Head-on 상태에서 θ_i 가 090° 일 때 우현 대 우현 통과, θ_i 가 270° 일 때 좌현 대 좌현으로 통과한다.

Crossing 상태에서 피항선이 유지선의 선수 방향으로 횡단하는 상황은 θ_i 가 $000^\circ \sim 060^\circ$ 구간에서 발생하고, 피항선이 유지선의 진로를 피하여 선미로 지나가는 상황은 θ_i 가 $180^\circ \sim 240^\circ$ 구간에서 주로 발생한다.

Overtaking 상태에서 추월선이 추월당하는 선박의 진로를 방해하며 선수로 지나가는 상황은 θ_i 가 $030^\circ \sim 060^\circ$, $300^\circ \sim 330^\circ$ 구간에서 발생하고, 추월선이 추월당하는 선박의 진로를 피하여 선미로 통과하는 상황은 $150^\circ \sim 210^\circ$ 구간에서 주로 발생한다.

Crossing, Overtaking 상태에서 타선박이 i 선박(자선)의 선수로 횡단하거나 추월하는 상황은 θ_i 가 $000^\circ \sim 060^\circ$, $300^\circ \sim 360^\circ$ 구간에서 주로 발생하고, 타선박이 i 선박(자선)의 선미로 통과하거나 지나가는 상황은 θ_i 가 $120^\circ \sim 240^\circ$ 구간에서 발생한다.

이처럼 Head-on, Crossing, Overtaking 상태에서 CPA에서의 θ_i 에 따라 상대적으로 위험이 크다고 판단되는 구간은 붉은색으로, 그에 비해 상대적으로 위험이 낮다고 판단되는 구간은 파란색으로 표시하면 Table 3.2와 같다.

여기서 $000^\circ \sim 060^\circ$ 구간(우현선수)과 $300^\circ \sim 360^\circ$ 구간(좌현선수)은 붉은색이 거의 모든 조우 상황에서 나타났고, $150^\circ \sim 210^\circ$ 구간(선미)은 파란색이 거의 모든 조우 상황에서 나타났다. 또한 120° 구간(우현선미)과 $240^\circ \sim 270^\circ$ 구간(좌현)은 파란색이 한 곳으로 다른 구간에 비해 상대적으로 가장 안전한 구간으로 판단된다.

이러한 패턴을 이용하여 CPA에서의 타선박 상대방위에 따른 위험값을 가장 위험한 구간은 1.0, 중간 구간은 0.7, 그리고 안전한 구간은 0.3이라 정하고, sech 함수를 이용하여 주요 방위에 대한 최대 위험값을 선수 방향(000° 또는 360°)은 1.0, 우현방향(090°)은 0.7, 좌현방향(270°)은 0.3, 그리고 선미방향(180°)은 0.7로 하여 상대방위에 따른 위험값을 식(3.3)과 같이 구하였다(이진석 외 2015).

Table 3.2 Relative risk interval due to θ_i

| θ_i | Head-on | Crossing | Overtaking | i 선박 관점 |
|------------|---------|----------|------------|-----------|
| 000 | | 피항선이 유지선 | | 타선박이 i선박의 |
| 030 | | 선수 방향으로 | 추월당하는 선박 | 선수로 횡단 |
| 060 | | 횡단 | 진로를 방해 | 또는 추월 |
| 090 | 우현 대 우현 | | | |
| 120 | | | | 타선박이 i선박의 |
| 150 | | | 추월당하는 선박 | 선미로 통과 |
| 180 | | 피항선이 유지선 | 진로를 피하여 | 또는 지나침 |
| 210 | | 선미 방향으로 | 선미로 통과 | |
| 240 | | 통과 | | |
| 270 | 좌현 대 좌현 | | | |
| 300 | | | 추월당하는 선박 | 타선박이 i선박의 |
| 330 | | | 진로를 방해 | 선수로 횡단 |
| 360 | | | | 또는 추월 |

$$R_{cpa}(\theta) = \begin{cases} a \cdot \text{sech}(d \cdot \theta), & \text{if } 0 \leq \theta < \frac{2\pi}{3} \\ b \cdot \text{sech}\{e(\theta - \pi)\}, & \text{else } \frac{2\pi}{3} \leq \theta < \frac{3\pi}{2} \\ c \cdot \text{sech}\{f(\theta - 2\pi)\}, & \text{else } \frac{3\pi}{2} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (3.3)$$

θ 는 CPA에서의 타선박 상대방위

a, b, c, 는 선수·선미의 최대 위험값 계수

d, e, f 는 위험 정도에 따른 기울기 계수

여기서, 선수 최대 위험값 계수 a와 c는 1.0, 선미 최대 위험값 계수 b는 0.7이며, 위험 정도에 따른 기울기 계수 d, e, f는 상대방위의 따른 위험값의 연속성을 위하여 0.6, 0.8, 1.1로 각각 설정하였다.

식(3.3)을 그래프로 나타내면 Fig. 3.10의 (a)와 같고, 이를 상대방위별로 표시하면 Fig. 3.10의 (b)와 같다.

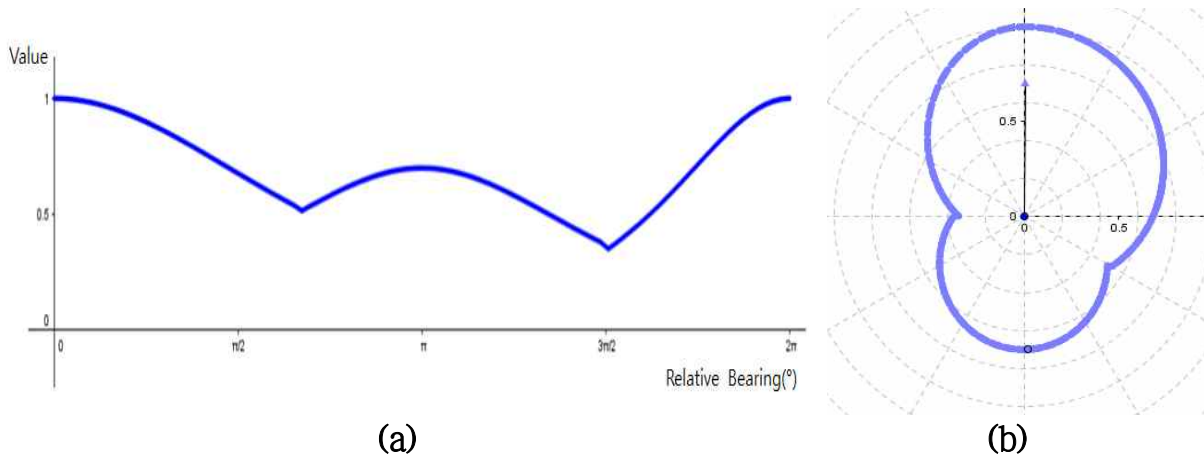


Fig. 3.10 Value of the risk by Relative Bearing in the Point of CPA

Table. 3.1에서 θ_i 가 030° , θ_j 가 150° 인 경우와 θ_i 가 150° , θ_j 가 030° 인 경우를 비교하면, i 선박은 유지선에서 피항선으로, j 선박은 피항선에서 유지선으로 입장이 서로 바뀌지만, VTS 관점에서 양 선박의 관계는 속력이 같은 두 선박 중 피항선이 좌현에서 유지선의 선수로 조우각 120° 로 횡단하는 조우 상황이 된다.

마찬가지로 θ_i 가 060° , θ_j 가 120° 인 경우와 θ_i 가 120° , θ_j 가 060° 인 경우를 비교하면, VTS 관점에서 양 선박의 관계는 속력이 같은 두 선박 중 피항선이 유지선 좌현에서 선수로 조우각 060° 로 횡단하는 조우 상황이 된다.

이처럼 CPA에서 양 선박의 상대방위가 각각 같다면 VTS 관점에서 같은 선박 조우 상황이 되고, 결국 두 선박의 상대방위에 따라 조우 상황을 판단할 수 있다.

이와 같이 양 선박의 조우 상황에 따른 위험지수(Risk of Encounter, E_{ij})는 CPA에서의 i 선박 상대방위에 따른 위험값($R_{cpa}(\theta_i)$)과 CPA에서의 j 선박 상대방위에 따른 위험값($R_{cpa}(\theta_j)$)의 합으로 구할 수 있다(이진석 외, 2015).

$$E_{ij} = R_{cpa}(\theta_i) + R_{cpa}(\theta_j) \quad (3.4)$$

단, $CPA < L_i + L_j$ 일 때 E_{ij} 는 최대

E_{ij} 는 i 선박과 j 선박이 근접하며 일정한 거리를 두고 통과할 때 조우 상황에 따른 위험을 나타낸 것으로, CPA가 양 선박 길이의 합($L_i + L_j$)보다 작으면 양 선박이 어떠한 조우 상황으로 접근하여도 충돌의 위험이 매우 커지므로 최대가 된다.

식(3.4)를 적용하여 앞서 비교한 Fig. 3.3부터 Fig. 3.7의 각 조우 상황에 대하여 $R_{cpa}(\theta_i)$, $R_{cpa}(\theta_j)$, 그리고 E_{ij} 를 각각 구하면 Table. 3.3과 같다.

Table 3.3 Risk value and E_{ij} for each Fig.

| Fig. | | θ_i | θ_j | $R_{cpa}(\theta_i)$ | $R_{cpa}(\theta_j)$ | E_{ij} |
|------|-----|------------|------------|---------------------|---------------------|----------|
| 3.3 | (a) | 270° | 270° | 0.37 | 0.37 | 0.74 |
| | (b) | 090° | 090° | 0.68 | 0.68 | 1.35 |
| 3.4 | (a) | 045° | 115° | 0.90 | 0.55 | 1.45 |
| | (b) | 045° | 107° | 0.90 | 0.59 | 1.49 |
| | (c) | 045° | 135° | 0.90 | 0.58 | 1.48 |
| | (d) | 045° | 160° | 0.90 | 0.67 | 1.57 |
| 3.5 | (a) | 135° | 069° | 0.58 | 0.79 | 1.37 |
| | (b) | 135° | 062° | 0.58 | 0.82 | 1.40 |
| | (c) | 135° | 045° | 0.58 | 0.90 | 1.48 |
| | (d) | 135° | 020° | 0.58 | 0.98 | 1.56 |
| 3.6 | (a) | 225° | 290° | 0.58 | 0.49 | 1.07 |
| | (b) | 225° | 298° | 0.58 | 0.56 | 1.14 |
| | (c) | 225° | 315° | 0.58 | 0.72 | 1.30 |
| | (d) | 225° | 340° | 0.58 | 0.93 | 1.51 |
| 3.7 | (a) | 315° | 249° | 0.72 | 0.47 | 1.19 |
| | (b) | 315° | 242° | 0.72 | 0.50 | 1.22 |
| | (c) | 315° | 225° | 0.72 | 0.58 | 1.30 |
| | (d) | 315° | 200° | 0.72 | 0.67 | 1.39 |

3.2.4 설문 분석을 통한 위험지수의 검증

H. Imazu(Imazu et al., 2002)에 따르면 자선과 타선의 예상 침로에 따라 충돌 위험이 높은 zone을 Fig. 3.11과 같이 표시하고, 선박을 운항하는 항해사가 이 zone을 피하여 선박의 침로를 변경하면 충돌을 피할 수 있는 개념으로 이 zone을 OZT(Obstacle Zone by Target, 이하 OZT)라 정의하였다.

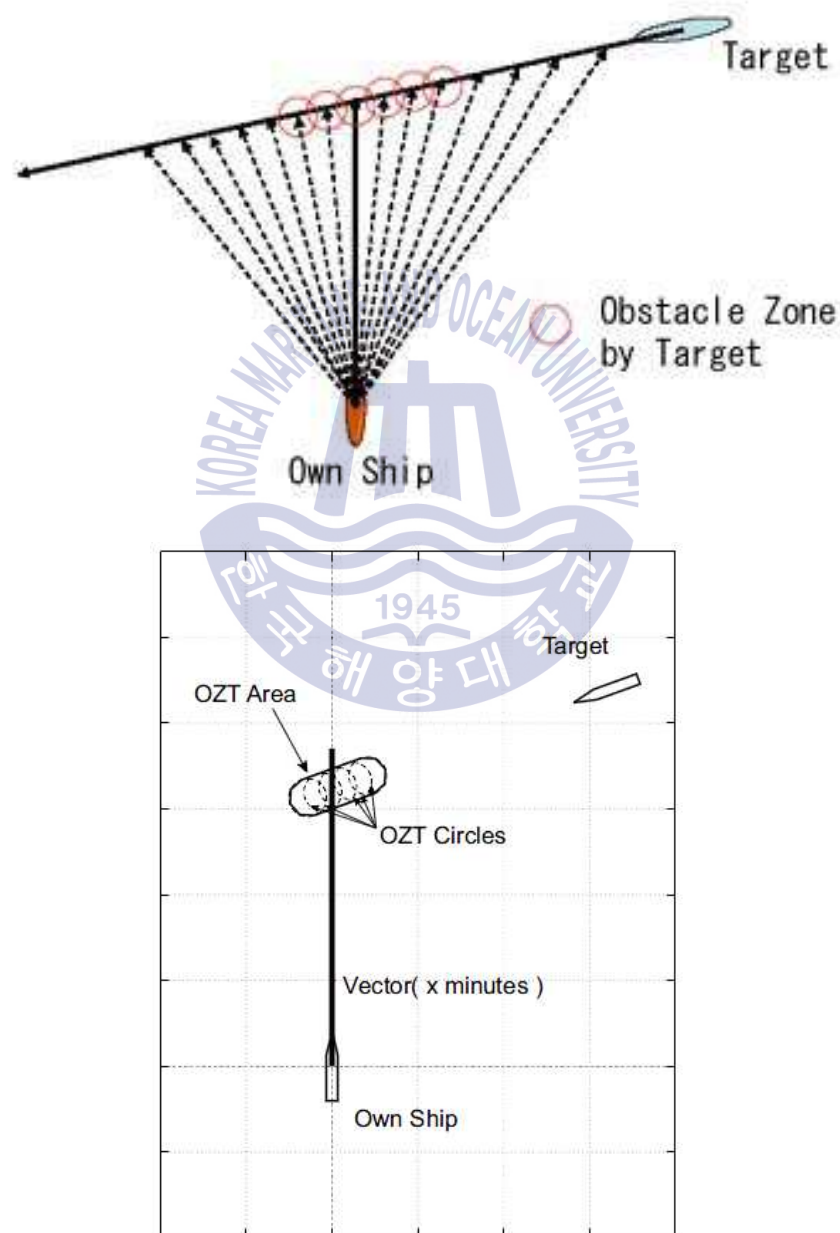


Fig. 3.11 Image and Definition of OZT(Jun kayano, 2009., Junji Fukuto, 2013)

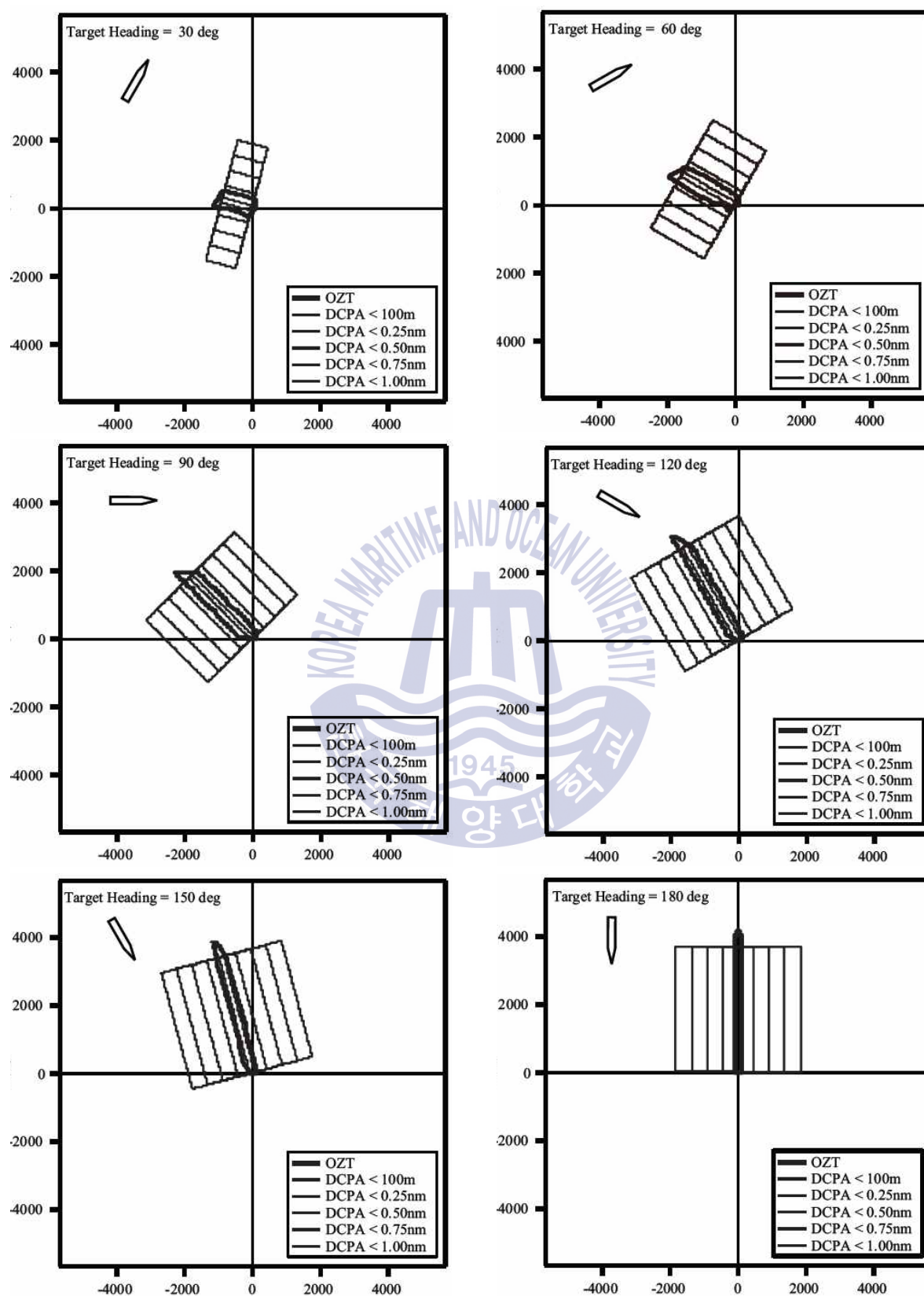


Fig. 3.12 Alarm areas for different target encountered angles(Junji Fukuto, 2013)

Fig. 3.12는 CPA를 100m, 0.25마일, 0.5마일, 0.75마일, 그리고 1.0마일 이하로 변경하고 좌현에서 접근하고 있는 타선박의 침로를 030° , 060° , 090° , 120° , 150° , 그리고 180° 으로 변경할 때, Alarm area와 OZT(굵은 등고선)를 각각 나타낸 것으로, 직사각형 형태로 표시된 것이 Alarm area로 CPA가 커질수록 점점 넓게 표시된다.

양 선박의 조우각에 따른 Alarm area와 OZT의 관계를 확인한 결과, 모든 Crossing 상태에서 OZT는 CPA가 0.25마일 이하인 Alarm area와 거의 일치하거나 작았고, Head-on 상태에서는 CPA가 100m 이하인 Alarm area와 일치하였다.(Junji Fukuto, 2013). 이는 양 선박의 CPA가 0.25마일 이하로 조우할 때 OZT가 계산되어 나타남을 알 수 있다.

이를 기초로 본 논문에서 정의한 CPA에서의 상대방위에 따른 선박 조우 상황 위험지수(E_{ij})가 VTSO 관점에서 조우 상황을 판단하기에 타당한지 아닌지를 확인하기 위하여 부산항·부산 신항·대산항·목포항에 근무하는 VTSO와 해양수산연수원에서 교육 중인 OoW를 대상으로 아래와 같은 조건으로 설문을 하였다.

| | |
|--------|--|
| Case 1 | <ul style="list-style-type: none"> ① 두선박의 CPA=0.2마일, TCPA=6분 ② 그림과 같은 상황까지 두 선박에선 어떠한 조치도 없었음 (변침, 감속 등) ③ 두 선박의 선종(일반화물선)과 톤수(5,000톤)는 동일하다고 가정 ④ 항법에 따른 유지선, 피항선, 추월선 및 피추월선 관계 고려 |
| Case 2 | <ul style="list-style-type: none"> ① 그림과 같은 상황까지 두 선박에선 어떠한 조치도 없었음 (변침, 감속 등) ② 두 선박의 선종(일반화물선)과 톤수(5,000톤)는 동일하다고 가정 ③ 항법에 따른 유지선, 피항선, 추월선 및 피추월선 관계 고려 |

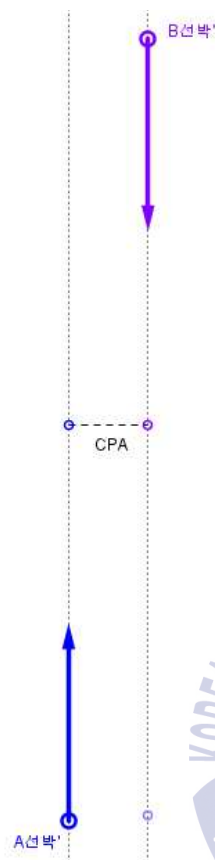
Case 1의 조건으로 1차 설문을, Case 2의 조건으로 2차 설문을 실시하였으며, Fig. 3.13는 설문에 제시된 20가지 선박 조우 상황 중 Situation 1부터 Situation 4를 나타낸 것으로 각 조우 상황(S1~S20)에 대하여 충돌 위험도 측정에 대한 VTSO와 OoW의 평균(M), 표준편차(SD), 95% 신뢰구간은 Table. 3.4와 같다.

Table. 3.4에서 1차 설문에 응한 VTSO는 (a), 2차에 응한 VTSO는 (b)이며, 설문 에 제시된 나머지 16가지 조우 상황은 부록 I (조우상황에 따른 선박 충돌 위험도 연구 설문지)과 같다.

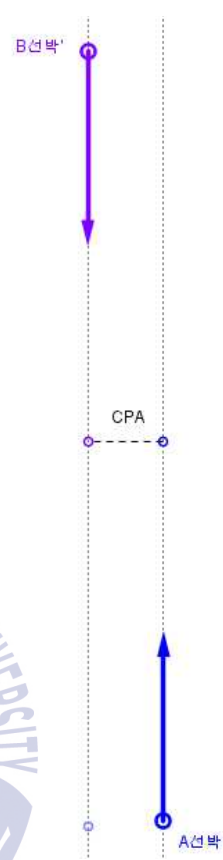
Table 3.4 Survey results of VTSOs and OoWs

| S | VTSO(M) | | SD | | 95% Con. | | | | OoW (M) | SD | 95% Con. | |
|----|---------|------|------|------|----------|------|-------|------|------------|------|----------|-------|
| | (a) | (b) | (a) | (b) | Lower | | Upper | | | | Lower | Upper |
| | | | | | (a) | (b) | (a) | (b) | | | | |
| 1 | 1.21 | 1.13 | 0.40 | 0.25 | 1.10 | 1.03 | 1.32 | 1.22 | 1.15 | 0.21 | 1.09 | 1.21 |
| 2 | 0.61 | 0.68 | 0.40 | 0.19 | 0.50 | 0.61 | 0.72 | 0.75 | 0.70 | 0.23 | 0.64 | 0.77 |
| 3 | 0.95 | 0.99 | 0.39 | 0.19 | 0.84 | 0.92 | 1.06 | 1.07 | 0.89 | 0.27 | 0.81 | 0.97 |
| 4 | 0.96 | 0.97 | 0.36 | 0.23 | 0.85 | 0.88 | 1.06 | 1.06 | 0.90 | 0.25 | 0.83 | 0.97 |
| 5 | 1.33 | 1.38 | 0.46 | 0.24 | 1.20 | 1.29 | 1.45 | 1.47 | 1.38 | 0.28 | 1.30 | 1.46 |
| 6 | 1.39 | 1.34 | 0.42 | 0.40 | 1.27 | 1.18 | 1.50 | 1.49 | 1.39 | 0.25 | 1.32 | 1.46 |
| 7 | 1.18 | 1.14 | 0.43 | 0.42 | 1.06 | 0.98 | 1.30 | 1.30 | 1.26 | 0.23 | 1.20 | 1.32 |
| 8 | 1.27 | 1.18 | 0.43 | 0.41 | 1.15 | 1.03 | 1.39 | 1.34 | 1.20 | 0.21 | 1.14 | 1.25 |
| 9 | 1.30 | 1.27 | 0.42 | 0.37 | 1.18 | 1.13 | 1.42 | 1.41 | 1.20 | 0.20 | 1.14 | 1.25 |
| 10 | 1.39 | 1.30 | 0.37 | 0.40 | 1.29 | 1.15 | 1.49 | 1.46 | 1.31 | 0.29 | 1.23 | 1.39 |
| 11 | 1.56 | 1.43 | 0.28 | 0.34 | 1.48 | 1.30 | 1.64 | 1.56 | 1.42 | 0.33 | 1.33 | 1.52 |
| 12 | 1.49 | 1.44 | 0.31 | 0.32 | 1.40 | 1.32 | 1.57 | 1.56 | 1.50 | 0.30 | 1.42 | 1.58 |
| 13 | 1.51 | 1.48 | 0.32 | 0.39 | 1.42 | 1.33 | 1.60 | 1.63 | 1.57 | 0.23 | 1.50 | 1.63 |
| 14 | 1.58 | 1.53 | 0.36 | 0.36 | 1.48 | 1.39 | 1.68 | 1.66 | 1.55 | 0.28 | 1.47 | 1.63 |
| 15 | 1.50 | 1.47 | 0.42 | 0.29 | 1.38 | 1.36 | 1.62 | 1.58 | 1.45 | 0.26 | 1.37 | 1.52 |
| 16 | 1.54 | 1.36 | 0.33 | 0.35 | 1.44 | 1.23 | 1.63 | 1.48 | 1.42 | 0.24 | 1.35 | 1.49 |
| 17 | 1.43 | 1.41 | 0.35 | 0.34 | 1.34 | 1.28 | 1.53 | 1.53 | 1.48 | 0.27 | 1.40 | 1.56 |
| 18 | 1.54 | 1.41 | 0.36 | 0.40 | 1.44 | 1.25 | 1.64 | 1.56 | 1.45 | 0.23 | 1.39 | 1.52 |
| 19 | 1.37 | 1.41 | 0.41 | 0.33 | 1.26 | 1.29 | 1.49 | 1.54 | 1.44 | 0.31 | 1.36 | 1.53 |
| 20 | 1.50 | 1.41 | 0.26 | 0.34 | 1.42 | 1.29 | 1.57 | 1.54 | 1.42 | 0.27 | 1.34 | 1.49 |

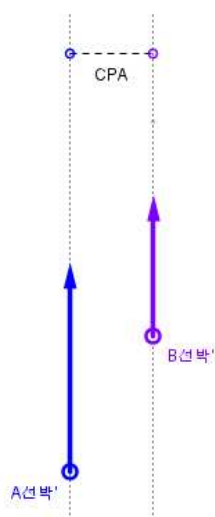
Situation 1 ($v_a=10\text{kts}$, $v_b=10\text{kts}$)



Situation 2 ($v_a=10\text{kts}$, $v_b=10\text{kts}$)



Situation 3 ($v_a=10\text{kts}$, $v_b=7\text{kts}$)



Situation 4 ($v_a=10\text{kts}$, $v_b=7\text{kts}$)

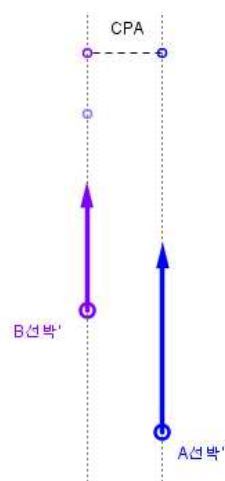


Fig. 3.13 Encountering situations presented in the survey

VTSO중에서 1차 설문에 응한 집단을 VTSO(a), 2차 설문에 응한 집단을 VTSO(b)라 하고 CoW를 포함한 세 집단의 평균 위험정도가 각 조우상황(S)에 대하여 차이가 없다고 판단할 수 있는지 결정하기 위하여 일원 배치 분산분석(One-Way ANOVA)을 하였다.

일원 배치 분산분석의 귀무가설은 ‘모집단들의 평균은 차이가 없다’, 대립가설은 ‘적어도 두 모집단의 평균이 서로 차이가 있다’로, 유의확률(p)이 유의수준 .05보다 크면 귀무가설을 채택할 수 있다는 것을 의미하고, 유의확률(p)이 유의수준 .05보다 작으면 귀무가설은 기각되고 대립가설을 채택하여 사후분석으로 집단수준 간의 평균을 비교하게 된다(김호일, 2006; 유성모, 2014).

IBM SPSS Statistics을 이용하여 일원배치 분산분석을 실시한 결과는 Table. 3.5와 같다.

Table 3.5 One-Way ANOVA according to each encounter situation

| S | 구분 | | M | SD | S | 구분 | | M | SD |
|---|--------|------------|-------------|------|----|--------|------------|--------------|------|
| 1 | 그 룹 | OoW | 1.15 | 0.21 | 11 | 그 룹 | OoW | 1.42 | 0.33 |
| | | VTSO(a) | 1.21 | 0.40 | | | VTSO(a) | 1.56 | 0.28 |
| | | VTSO(b) | 1.13 | 0.25 | | | VTSO(b) | 1.43 | 0.34 |
| | | F-value(p) | .998(.371) | | | | F-value(p) | 2.682(0.072) | |
| 2 | 그 룹 | OoW | 0.70 | 0.23 | 12 | 그 룹 | OoW | 1.50 | 0.30 |
| | | VTSO(a) | 0.61 | 0.40 | | | VTSO(a) | 1.49 | 0.31 |
| | | VTSO(b) | 0.68 | 0.19 | | | VTSO(b) | 1.44 | 0.32 |
| | | F-value(p) | 1.235(.294) | | | | F-value(p) | .269(.765) | |
| 3 | 그 룹 | OoW | 0.89 | 0.27 | 13 | 그 룹 | OoW | 1.57 | 0.23 |
| | | VTSO(a) | 0.95 | 0.39 | | | VTSO(a) | 1.51 | 0.32 |
| | | VTSO(b) | 0.99 | 0.19 | | | VTSO(b) | 1.48 | 0.39 |
| | | F-value(p) | 1.289(.279) | | | | F-value(p) | 1.426(.244) | |

| S | 구분 | | M | SD | S | 구분 | | M | SD |
|----|--------|------------|-------------|------|----|--------|------------|--------------|------|
| 4 | 그 룹 | OoW | 0.90 | 0.25 | 14 | 그 룹 | OoW | 1.55 | 0.28 |
| | | VTSO(a) | 0.96 | 0.36 | | | VTSO(a) | 1.58 | 0.36 |
| | | VTSO(b) | 0.97 | 0.23 | | | VTSO(b) | 1.53 | 0.36 |
| | | F-value(p) | .726(.486) | | | | F-value(p) | .279(.759) | |
| 5 | 그 룹 | OoW | 1.38 | 0.28 | 15 | 그 룹 | OoW | 1.45 | 0.26 |
| | | VTSO(a) | 1.33 | 0.46 | | | VTSO(a) | 1.50 | 0.42 |
| | | VTSO(b) | 1.38 | 0.24 | | | VTSO(b) | 1.47 | 0.29 |
| | | F-value(p) | .256(.775) | | | | F-value(p) | .667(.515) | |
| 6 | 그 룹 | OoW | 1.39 | 0.25 | 16 | 그 룹 | OoW | 1.42 | 0.24 |
| | | VTSO(a) | 1.39 | 0.42 | | | VTSO(a) | 1.54 | 0.33 |
| | | VTSO(b) | 1.34 | 0.40 | | | VTSO(b) | 1.35 | 0.35 |
| | | F-value(p) | .480(.620) | | | | F-value(p) | 4.054(.020*) | |
| 7 | 그 룹 | OoW | 1.26 | 0.23 | 17 | 그 룹 | OoW | 1.48 | 0.27 |
| | | VTSO(a) | 1.18 | 0.43 | | | VTSO(a) | 1.43 | 0.35 |
| | | VTSO(b) | 1.14 | 0.42 | | | VTSO(b) | 1.41 | 0.34 |
| | | F-value(p) | 1.365(.259) | | | | F-value(p) | .667(.515) | |
| 8 | 그 룹 | OoW | 1.20 | 0.21 | 18 | 그 룹 | OoW | 1.45 | 0.23 |
| | | VTSO(a) | 1.27 | 0.43 | | | VTSO(a) | 1.54 | 0.36 |
| | | VTSO(b) | 1.18 | 0.41 | | | VTSO(b) | 1.41 | 0.40 |
| | | F-value(p) | .775(.463) | | | | F-value(p) | 2.301(.104) | |
| 9 | 그 룹 | OoW | 1.20 | 0.20 | 19 | 그 룹 | OoW | 1.44 | 0.31 |
| | | VTSO(a) | 1.30 | 0.42 | | | VTSO(a) | 1.37 | 0.41 |
| | | VTSO(b) | 1.27 | 0.37 | | | VTSO(b) | 1.41 | 0.33 |
| | | F-value(p) | 1.281(.281) | | | | F-value(p) | .463(.630) | |
| 10 | 그 룹 | OoW | 1.31 | 0.29 | 20 | 그 룹 | OoW | 1.42 | 0.27 |
| | | VTSO(a) | 1.39 | 0.37 | | | VTSO(a) | 1.50 | 0.26 |
| | | VTSO(b) | 1.30 | 0.40 | | | VTSO(b) | 1.41 | 0.34 |
| | | F-value(p) | 1.017(.364) | | | | F-value(p) | 1.145(.322) | |

*p<.05

설문에 제시된 각 조우 상황에 대한 집단 간의 평균 위험 정도가 차이가 없다는 귀무가설에 대한 검정통계 F-value에 대한 유의확률(p)이 Situation 16(p=.012)을 제외하고 대부분의 조우 상황에서 일반적인 유의수준 .05보다 크게 나왔다.

Situation 16에 대한 사후분석에서 각 그룹 수준의 평균비교 시 등분산을 가정한 사후검정 결과인 Scheffe 출력 결과, VTSO(a)와 VTSO(b)의 경우 유의확률이 일반적인 유의수준 .05보다 작은 .032로 나타났다. 이는 VTSO(a)가 VTSO(b)보다 평균 위험 정도가 높게 나타났다는 것을 의미한다.

결과적으로 VTSO와 OoW 모두 대부분의 조우 상황에 대하여 ‘각 그룹 수준의 위험 정도에 대한 평균 차이가 없다’라는 귀무가설을 채택할 수 있었다.

다음으로 설문에 제시된 각 조우 상황에 대하여 식(3.4)에 의해 산출한 E_{ij} 값과 VTSO(a)와 VTSO(b) 그리고 OoW가 느끼는 평균 위험 정도를 비교한 그래프는 Fig. 3.14와 같다.

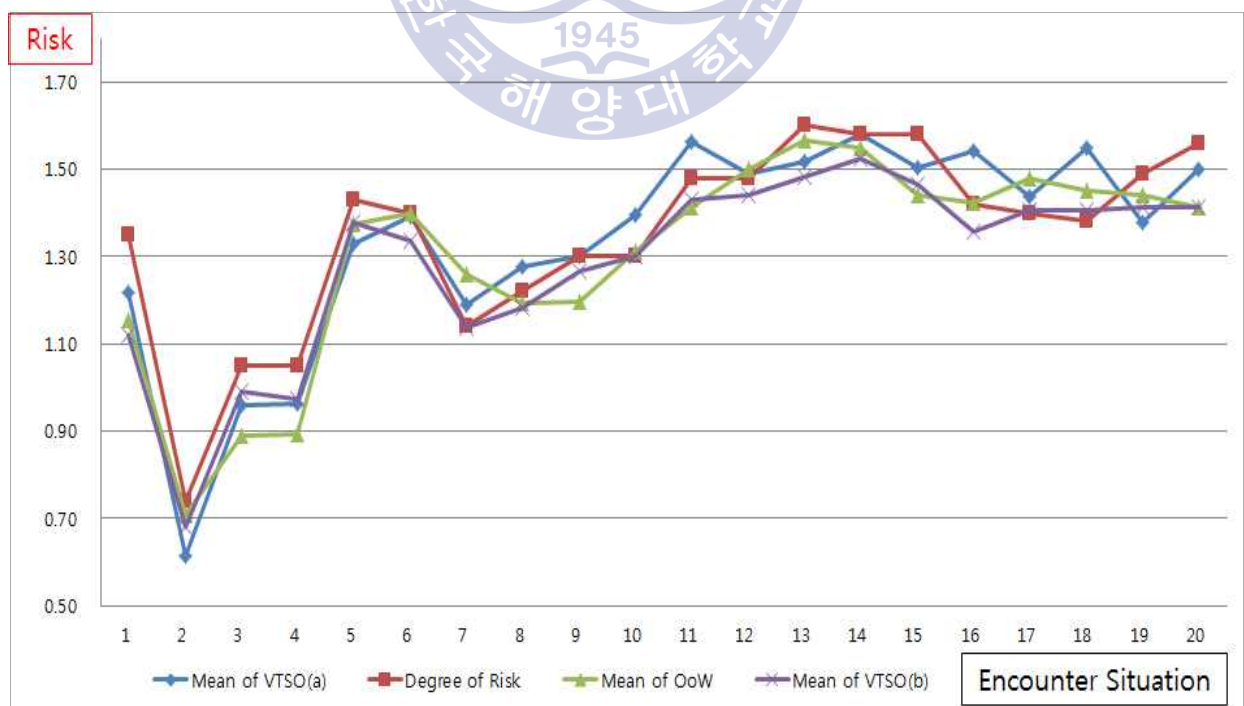


Fig. 3.14 Comparison of Average of survey & Degree of Risk

설문에 제시된 각 선박 조우 상황에 대하여 VTSO와 OoW가 느끼는 위험 정도 평균과 E_{ij} 을 비교하면 좌현 대 좌현 통과 상황(Situation 2)에서 VTSO(a)는 0.61, VTSO(b)는 0.68, OoW는 0.70, 그리고 E_{ij} 은 0.74로 산출되었고, 우현 대 우현 통과 상황(Situation 1)에서 VTSO(a)는 1.21, VTSO(b)는 1.13, OoW는 1.15, 그리고 E_{ij} 은 1.35로 좌현 대 좌현보다 높게 산출되었다.

양 선박이 조우각 110° 로 조우하는 Situation 6과 7에서 VTSO는 피항선이 유지선 선수를 횡단하는 Situation 6(1.39/1.34)이 유지선 선미를 통과하는 Situation 7(1.18/1.14)보다 높았고, OoW는 Situation 6(1.39)이 유지선 선미를 통과하는 Situation 7(1.26)보다 높았으며, E_{ij} 도 마찬가지로 Situation 6(1.40)이 Situation 7(1.14)보다 높았다.

피항선이 유지선 선수를 지나는 조우 상황에서 두 선박의 조우각이 110° (S6)에서 90° (S11), 45° (S14)로 바뀔 때 VTSO(a)는 $1.39 \rightarrow 1.56 \rightarrow 1.58$ 으로, VTSO(b)는 $1.34 \rightarrow 1.43 \rightarrow 1.53$ 로, 그리고 OoW는 $1.39 \rightarrow 1.42 \rightarrow 1.55$ 로 점점 높아졌고, 같은 조우 상황에 대한 E_{ij} 는 $1.40 \rightarrow 1.48 \rightarrow 1.58$ 로 점점 높게 산출되었다. 또한, 조우각이 위와 같이 바뀌고 피항선이 유지선 선미를 지나는 조우 상황에서는 VTSO(a)는 $1.18 \rightarrow 1.39 \rightarrow 1.54$ 로, VTSO(b)는 $1.14 \rightarrow 1.30 \rightarrow 1.36$ 으로, 그리고 OoW는 $1.26 \rightarrow 1.31 \rightarrow 1.42$ 로 높아졌고, E_{ij} 값은 $1.14 \rightarrow 1.30 \rightarrow 1.42$ 로 높게 산출되었다.

이는 VTSO와 OoW 대부분이 양 선박의 조우 상황에서 좌현 대 좌현으로 통과하는 것이 우현 대 우현으로 통과하는 것보다 더 위험하고, 피항선이 유지선 선수로 횡단하는 것이 유지선 선미로 지나는 것보다 더 위험하며, 양 선박의 조우각이 좁아질수록 위험을 더 느끼는 것으로 나타났다. 마찬가지로 E_{ij} 값도 우현 대 우현 통과 시, 피항선이 유지선 선수로 횡단 시 그리고 조우각이 좁아질수록 더 높게 산출되었다.

E_{ij} 는 양 선박이 조우하는 상황을 고려한 위험 요소로써, 각 상황에 대한 E_{ij} 에 대한 VTSO와 OoW의 위험 정도 평균의 Pearson 상관계수는 VTSO(a) 0.935, VTSO(b) 0.964 그리고 OoW 0.930으로 강한 양의 상관관계를 보였다.

3.3 선박 간 최단 접근시간에 따른 위험지수

선박 간 조우상황과 근접 거리에 따른 위험요소 외에 VTSO가 충돌위험을 판단하는 세 번째 중요한 요소는 위험을 인지한 후 선박을 안전하게 통과할 수 있도록 조치할 수 있는 시간적 여유를 얼마나 확보하고 있느냐에 달려있다.

VTSO가 VTS 시스템 화면으로 모니터링을 하는 선박의 속력 벡터는 대부분 3분 또는 5분으로 설정되어 있다. 이를 통해 VTSO는 양 선박의 충돌 임박까지 남아 있는 시간을 예측하게 된다.

국내 선장을 대상으로 관제정보를 선박에 제공함에 있어서 적절한 시간대를 조사한 설문자료에 의하면 항로상 운항 선박 정보는 평균 9.3분 전, 항로 및 항계 밖 운항 선박 정보는 평균 18.7분 전에 제공하는 것이 적절하다고 응답하였다(이정구, 2016).

이에 충돌 위험이 임박한 양 선박에 대하여 여유 시간에 따라 VTSO가 느끼는 위험 정도와 AIS로 확인되는 선박 정보의 각 요인이 여유 시간에 미치는 영향 정도를 설문으로 조사하여 선박 간 최단 접근시간에 따른 위험지수(Risk of Time, T_{ij})를 구하고자 한다.

3.3.1 선박 간 접근시간에 따른 VTSO 위험 분석

양 선박 간 충돌 위험이 임박한 상황에서 남아 있는 여유 시간(10분~0분)에 따라 VTSO가 느끼는 위험의 정도를 조사하기 위하여 설문을 하고 VTSO 70명이 응답하였다.

양 선박 간 CPA가 0일 때 Head-on, Crossing(030° , 045° , 090° , 120° , 135° , 150°) 상태 등 13가지 상황에 대하여 VTSO가 느끼는 위험 정도를 남아 있는 시간대별(t_{10} 분~ t_0 분)로 조사한 결과는 Table. 3.6과 같고, 상황별 평균을 그래프로 나타내면 Fig. 3.15와 같다.

Table 3.6 Survey results of VTSOs due to time-remaining

| 2-1 (Stbd 090°) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
|---------------------|---------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------|
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 2.10000 | 1.99383 | .23831 | 1.6246 | 2.5754 |
| t9 | 2.68429 | 1.99925 | .23896 | 2.2076 | 3.1610 |
| t8 | 3.28143 | 2.06961 | .24737 | 2.7879 | 3.7749 |
| t7 | 3.94286 | 2.17673 | .26017 | 3.4238 | 4.4619 |
| t6 | 4.74571 | 2.25579 | .26962 | 4.2078 | 5.2836 |
| t5 | 5.65143 | 2.31189 | .27632 | 5.1002 | 6.2027 |
| t4 | 6.56143 | 2.30609 | .27563 | 6.0116 | 7.1113 |
| t3 | 7.54143 | 2.09433 | .25032 | 7.0421 | 8.0408 |
| t2 | 8.50286 | 1.71954 | .20552 | 8.0928 | 8.9129 |
| t1 | 9.32429 | 1.03706 | .12395 | 9.0770 | 9.5716 |
| t0 | 9.87857 | 0.46963 | .05613 | 9.7666 | 9.9905 |
| 2-2 (Stbd 135°) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 2.6786 | 2.04662 | .24462 | 2.1906 | 3.1666 |
| t9 | 3.3271 | 1.97953 | .23660 | 2.8551 | 3.7991 |
| t8 | 4.0029 | 1.98377 | .23711 | 3.5298 | 4.4759 |
| t7 | 4.7171 | 2.08271 | .24893 | 4.2205 | 5.2137 |
| t6 | 5.5257 | 2.07997 | .24860 | 5.0298 | 6.0217 |
| t5 | 6.3671 | 1.95261 | .23338 | 5.9016 | 6.8327 |
| t4 | 7.2371 | 1.88042 | .22475 | 6.7888 | 7.6855 |
| t3 | 8.0014 | 1.77466 | .21211 | 7.5783 | 8.4246 |
| t2 | 8.7271 | 1.52239 | .18196 | 8.3641 | 9.0901 |
| t1 | 9.3757 | 1.15400 | .13793 | 9.1006 | 9.6509 |
| t0 | 9.7029 | 0.97846 | .11695 | 9.4696 | 9.9362 |
| 2-3 (Stbd 150°) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 3.2314 | 2.52722 | .30206 | 2.6288 | 3.8340 |
| t9 | 3.8800 | 2.40860 | .28788 | 3.3057 | 4.4543 |
| t8 | 4.5371 | 2.42626 | .28999 | 3.9586 | 5.1157 |
| t7 | 5.1486 | 2.45957 | .29397 | 4.5621 | 5.7350 |
| t6 | 5.7957 | 2.44780 | .29257 | 5.2121 | 6.3794 |
| t5 | 6.4757 | 2.39767 | .28658 | 5.9040 | 7.0474 |
| t4 | 7.1929 | 2.37672 | .28407 | 6.6261 | 7.7596 |
| t3 | 7.8757 | 2.23415 | .26703 | 7.3430 | 8.4084 |
| t2 | 8.5371 | 1.97896 | .23653 | 8.0653 | 9.0090 |
| t1 | 9.1071 | 1.60256 | .19154 | 8.7250 | 9.4893 |
| t0 | 9.5571 | 1.25843 | .15041 | 9.2571 | 9.8572 |

| 2-4 (Port 090°) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
|---------------------|--------|-------------------|--------------------|-------------------------|---------|
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 1.9714 | 1.91085 | .22839 | 1.5158 | 2.4271 |
| t9 | 2.5814 | 1.88090 | .22481 | 2.1329 | 3.0299 |
| t8 | 3.2143 | 1.98255 | .23696 | 2.7416 | 3.6870 |
| t7 | 3.8800 | 2.10518 | .25162 | 3.3780 | 4.3820 |
| t6 | 4.6543 | 2.25746 | .26982 | 4.1160 | 5.1926 |
| t5 | 5.5443 | 2.28858 | .27354 | 4.9986 | 6.0900 |
| t4 | 6.4743 | 2.25065 | .26900 | 5.9376 | 7.0109 |
| t3 | 7.4643 | 2.09679 | .25061 | 6.9643 | 7.9642 |
| t2 | 8.4571 | 1.72657 | .20636 | 8.0455 | 8.8688 |
| t1 | 9.3329 | 1.08183 | .12930 | 9.0749 | 9.5908 |
| t0 | 9.9429 | .28921 | .03457 | 9.8739 | 10.0118 |

| 2-5 (Port 135°) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
|---------------------|--------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------|
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 2.5286 | 1.89179 | .22611 | 2.0775 | 2.9797 |
| t9 | 3.1471 | 1.84946 | .22105 | 2.7062 | 3.5881 |
| t8 | 3.7943 | 1.93472 | .23124 | 3.3330 | 4.2556 |
| t7 | 4.4857 | 2.04254 | .24413 | 3.9987 | 4.9727 |
| t6 | 5.2129 | 2.13052 | .25465 | 4.7049 | 5.7209 |
| t5 | 6.0243 | 2.08941 | .24973 | 5.5261 | 6.5225 |
| t4 | 6.9329 | 2.07090 | .24752 | 6.4391 | 7.4266 |
| t3 | 7.7643 | 2.03263 | .24295 | 7.2796 | 8.2490 |
| t2 | 8.5043 | 1.76663 | .21115 | 8.0830 | 8.9255 |
| t1 | 9.1800 | 1.35909 | .16244 | 8.8559 | 9.5041 |
| t0 | 9.6643 | .98805 | .11809 | 9.4287 | 9.8999 |

| 2-6 (Port 150°) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
|---------------------|--------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------|
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 3.1814 | 2.40587 | .28756 | 2.6078 | 3.7551 |
| t9 | 3.8279 | 2.31065 | .27618 | 3.2769 | 4.3788 |
| t8 | 4.4543 | 2.32508 | .27790 | 3.8999 | 5.0087 |
| t7 | 5.0821 | 2.37594 | .28398 | 4.5156 | 5.6487 |
| t6 | 5.7343 | 2.43119 | .29058 | 5.1546 | 6.3140 |
| t5 | 6.4214 | 2.35851 | .28190 | 5.8591 | 6.9838 |
| t4 | 7.2286 | 2.33127 | .27864 | 6.6727 | 7.7844 |
| t3 | 7.9100 | 2.21975 | .26531 | 7.3807 | 8.4393 |
| t2 | 8.5700 | 1.99160 | .23804 | 8.0951 | 9.0449 |
| t1 | 9.1543 | 1.62130 | .19378 | 8.7677 | 9.5409 |
| t0 | 9.5243 | 1.31903 | .15765 | 9.2098 | 9.8388 |

| 2-7 (Head-on) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
|------------------|--------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------|
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 2.9000 | 2.34459 | .28023 | 2.3410 | 3.4590 |
| t9 | 3.4164 | 2.26515 | .27074 | 2.8763 | 3.9565 |
| t8 | 3.9271 | 2.26690 | .27095 | 3.3866 | 4.4677 |
| t7 | 4.4779 | 2.31895 | .27717 | 3.9249 | 5.0308 |
| t6 | 5.1214 | 2.36287 | .28242 | 4.5580 | 5.6848 |
| t5 | 5.8250 | 2.41885 | .28911 | 5.2482 | 6.4018 |
| t4 | 6.6029 | 2.33933 | .27960 | 6.0451 | 7.1607 |
| t3 | 7.4679 | 2.29037 | .27375 | 6.9217 | 8.0140 |
| t2 | 8.2886 | 1.96701 | .23510 | 7.8196 | 8.7576 |
| t1 | 9.2029 | 1.22592 | .14653 | 8.9105 | 9.4952 |
| t0 | 9.8257 | .56994 | .06812 | 9.6898 | 9.9616 |

| 2-8 (Stbd 030°) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
|---------------------|--------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------|
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 2.4857 | 2.06238 | .24650 | 1.9940 | 2.9775 |
| t9 | 3.0414 | 1.99786 | .23879 | 2.5651 | 3.5178 |
| t8 | 3.6100 | 2.02693 | .24226 | 3.1267 | 4.0933 |
| t7 | 4.2486 | 2.10553 | .25166 | 3.7465 | 4.7506 |
| t6 | 4.9314 | 2.14155 | .25596 | 4.4208 | 5.4421 |
| t5 | 5.6786 | 2.21116 | .26428 | 5.1513 | 6.2058 |
| t4 | 6.5057 | 2.30361 | .27533 | 5.9564 | 7.0550 |
| t3 | 7.3929 | 2.30685 | .27572 | 6.8428 | 7.9429 |
| t2 | 8.2586 | 2.15504 | .25758 | 7.7447 | 8.7724 |
| t1 | 9.0314 | 1.61223 | .19270 | 8.6470 | 9.4159 |
| t0 | 9.6057 | .95930 | .11466 | 9.3770 | 9.8345 |

| 2-9 (Stbd 045°) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
|---------------------|--------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------|
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 2.3357 | 1.95367 | .23351 | 1.8699 | 2.8016 |
| t9 | 2.8357 | 1.93084 | .23078 | 2.3753 | 3.2961 |
| t8 | 3.4186 | 1.97090 | .23557 | 2.9486 | 3.8885 |
| t7 | 4.0386 | 2.04509 | .24444 | 3.5509 | 4.5262 |
| t6 | 4.7686 | 2.08052 | .24867 | 4.2725 | 5.2647 |
| t5 | 5.5514 | 2.06333 | .24661 | 5.0594 | 6.0434 |
| t4 | 6.4971 | 2.06776 | .24714 | 6.0041 | 6.9902 |
| t3 | 7.4829 | 1.98895 | .23773 | 7.0086 | 7.9571 |
| t2 | 8.4471 | 1.70215 | .20345 | 8.0413 | 8.8530 |
| t1 | 9.2814 | 1.27066 | .15187 | 8.9785 | 9.5844 |
| t0 | 9.6929 | 1.02961 | .12306 | 9.4474 | 9.9384 |

| 2-10 (Stbd 060°) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
|----------------------|--------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------|
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 2.5614 | 2.03529 | .24326 | 2.0761 | 3.0467 |
| t9 | 3.1043 | 1.98891 | .23772 | 2.6300 | 3.5785 |
| t8 | 3.7014 | 1.99641 | .23862 | 3.2254 | 4.1775 |
| t7 | 4.3600 | 2.00632 | .23980 | 3.8816 | 4.8384 |
| t6 | 5.0843 | 2.04384 | .24429 | 4.5969 | 5.5716 |
| t5 | 5.8414 | 2.12094 | .25350 | 5.3357 | 6.3471 |
| t4 | 6.7343 | 2.09484 | .25038 | 6.2348 | 7.2338 |
| t3 | 7.6571 | 1.99779 | .23878 | 7.1808 | 8.1335 |
| t2 | 8.5357 | 1.64793 | .19696 | 8.1428 | 8.9286 |
| t1 | 9.3243 | 1.15588 | .13815 | 9.0487 | 9.5999 |
| t0 | 9.7143 | .91117 | .10891 | 9.4970 | 9.9315 |

| 2-11 (Port 450°) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
|----------------------|--------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------|
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 2.4429 | 2.01182 | .24046 | 1.9632 | 2.9226 |
| t9 | 2.9800 | 1.99126 | .23800 | 2.5052 | 3.4548 |
| t8 | 3.5771 | 2.00739 | .23993 | 3.0985 | 4.0558 |
| t7 | 4.1986 | 2.07940 | .24854 | 3.7028 | 4.6944 |
| t6 | 4.8771 | 2.15589 | .25768 | 4.3631 | 5.3912 |
| t5 | 5.5514 | 2.20794 | .26390 | 5.0250 | 6.0779 |
| t4 | 6.4171 | 2.18917 | .26166 | 5.8952 | 6.9391 |
| t3 | 7.3386 | 2.08217 | .24887 | 6.8421 | 7.8350 |
| t2 | 8.2757 | 1.83053 | .21879 | 7.8392 | 8.7122 |
| t1 | 9.1414 | 1.35609 | .16208 | 8.8181 | 9.4648 |
| t0 | 9.6214 | 1.05100 | .12562 | 9.3708 | 9.8720 |

| 2-12 (Port 060°) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
|----------------------|--------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------|
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 2.5357 | 2.01495 | .24083 | 2.0553 | 3.0162 |
| t9 | 3.0543 | 1.93808 | .23164 | 2.5922 | 3.5164 |
| t8 | 3.6400 | 1.94067 | .23195 | 3.1773 | 4.1027 |
| t7 | 4.2600 | 1.95970 | .23423 | 3.7927 | 4.7273 |
| t6 | 4.9586 | 1.99554 | .23851 | 4.4828 | 5.4344 |
| t5 | 5.6729 | 2.05884 | .24608 | 5.1819 | 6.1638 |
| t4 | 6.5457 | 2.03539 | .24328 | 6.0604 | 7.0310 |
| t3 | 7.5371 | 1.95583 | .23377 | 7.0708 | 8.0035 |
| t2 | 8.4086 | 1.69190 | .20222 | 8.0052 | 8.8120 |
| t1 | 9.2086 | 1.28500 | .15359 | 8.9022 | 9.5150 |
| t0 | 9.6257 | .97158 | .11613 | 9.3940 | 9.8574 |

| 2-13 (Port 030°) | Mean | Std. Deviation | Std. Error Mean | 95% Confidence Interval | |
|----------------------|--------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------|
| | | | | Lower | Upper |
| t10 | 2.5500 | 2.21024 | .26417 | 2.0230 | 3.0770 |
| t9 | 3.0457 | 2.15182 | .25719 | 2.5326 | 3.5588 |
| t8 | 3.5814 | 2.17744 | .26025 | 3.0622 | 4.1006 |
| t7 | 4.2171 | 2.25022 | .26895 | 3.6806 | 4.7537 |
| t6 | 4.9371 | 2.30539 | .27555 | 4.3874 | 5.4868 |
| t5 | 5.6843 | 2.31483 | .27668 | 5.1323 | 6.2362 |
| t4 | 6.4771 | 2.36754 | .28298 | 5.9126 | 7.0417 |
| t3 | 7.2857 | 2.39234 | .28594 | 6.7153 | 7.8561 |
| t2 | 8.0986 | 2.19072 | .26184 | 7.5762 | 8.6209 |
| t1 | 8.9357 | 1.64282 | .19635 | 8.5440 | 9.3274 |
| t0 | 9.5857 | 1.03899 | .12418 | 9.3380 | 9.8335 |

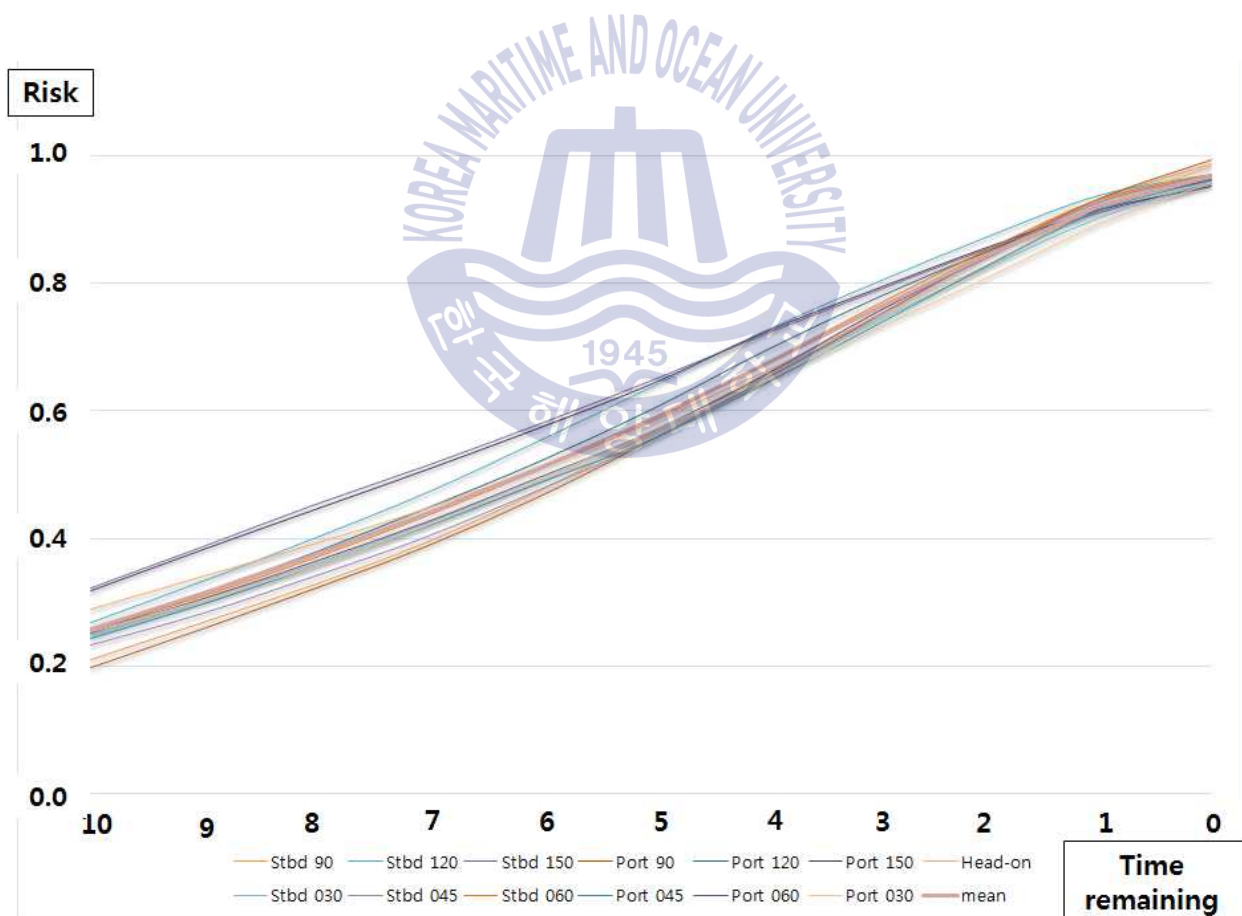


Fig. 3.15 Means of VTSO' s risk for each situation due to Time-remaining

Head-on, Crossing 상태에서 각 조우각에 대하여 VTSO가 느끼는 위험 정도를 평균한 결과, Fig. 3.15의 그래프와 같이 상황별로 큰 편차가 없었고 남아있는 여유 시간에 따라 일정하게 위험이 상승하는 것으로 나타났다.

따라서 sech(hyperbolic secant)함수 중 여유 시간에 따른 VTSO가 느끼는 위험 정도를 시간대별로 평균한 결과와 상관계수가 0.994로 가장 높은 $\text{sech}(0.2x)$ 을 식(3.5)에 적용하여 선박 간 접근시간 위험값(Risk of approach time, R_{at})을 구하고 이를 그래프로 나타내면 Fig. 3.16과 같다.

$$R_{at}(t) = \begin{cases} \text{sech}(g \cdot t), & t \geq 0 \\ \text{sech}(h \cdot t), & t < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

여기서, g와 h는 위험 정도에 따른 기울기 계수로서 g는 설문 결과와 상관계수가 높은 0.2로, 양 선박이 멀어지기 시작할 때부터는 위험이 감소하므로 이를 반영하기 위하여 h를 10.0으로 하였다.

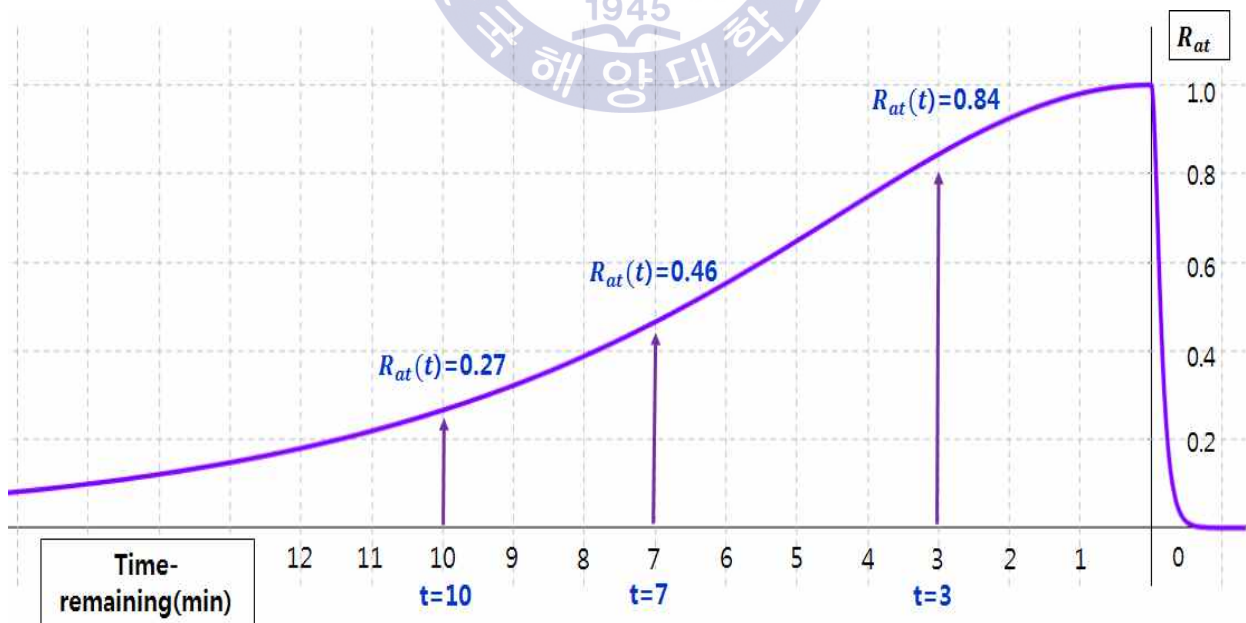


Fig. 3.16 A Graph of the Risk of approach time(R_{at})

3.3.2 접근시간에 미치는 영향에 따른 위험지수

AIS로 확인이 가능한 선박의 주요 정보 중 선종(Type of ship), 선박 길이(LOA), 선폭(Beam), 흘수(Draft), 발생시간대(Time, 4시간 간격)가 충돌 위험이 임박한 상황에서 남아 있는 시간에 따라 VTSO가 느끼는 위험에 미치는 영향 정도를 주요 요인과 세부 요인별로 조사하였다.

그 결과, Fig. 3.17과 같이 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 선종이 28.3%로 가장 높았으며, 다음으로 선박 길이(24.7%), 발생시간대(22.2%), 흘수(12.9%), 선폭(11.7%) 순이었다.

세부 요인으로 선종은 유조선이 가장 높았고 예부선, 여객선, 케미컬 운반선 순이었으며, 특히 VTSO는 예부선을 상당히 신경 쓰는 것으로 분석되었다.

선박 길이와 선폭, 그리고 흘수는 크기가 클수록 미치는 영향도 비례하였고, 시간은 04~08시 사이가 가장 위험한 시간대로 분석되었다.

이처럼 설문으로 조사된 i 선박 정보의 주요 요인과 세부 요인이 여유 시간에 미치는 영향(t_i)을 적용하면 식(3.6)과 같다.

$$t_i = t_{ij} - t_{ij} \left[\frac{I'_{type} + I'_{loa} + I'_{beam} + I'_{time} + I'_{draft}}{100} \right] \quad (3.6)$$

$$I'_{factor} = \frac{\sum_1^n \text{Effect of main factor}(\%) \cdot \text{Effect of detail factor}(\%)}{n(\text{Number of responses}) \cdot 100}$$

여기서, t_{ij} 는 i 선박과 j 선박의 최단 접근시간으로, 목표까지의 접근시간(Jeong, 2003)을 적용하여 식(3.7)과 같이 구하였다.

$$t_{ij}(\min) = \frac{R_{ij}}{\overrightarrow{v_i - v_j} \cdot \cos \delta} \quad (3.7)$$

R_{ij} : i 선박과 j 선박의 상대거리(NM)

$\overrightarrow{v_i - v_j}$: i 선박과 j 선박의 속력 벡터의 차

δ : 벡터 $\overrightarrow{v_i - v_j}$ 의 방향과 양 선박의 거리 선분($\overline{R_{ij}}$)이 이루는 각

일반적으로 선박 간 여유 시간을 계산할 때 TCPA를 많이 사용하지만, TCPA는 CPA와 같이 사용할 때 의미가 있다.

반면, 최단 접근시간(t_{ij})은 CPA와 관계없이 양 선박이 근접하는데 얼마의 시간적 여유가 있는지를 알 수 있고 선박의 급격한 변침에 따른 양 선박 간 접근시간의 변화를 실시간으로 계산할 수 있다.

선박 간 최단 접근시간에 따른 위험지수(Risk of Time, T_{ij})는 양 선박의 선종, 길이, 시간대 등 각 요인이 충돌 임박까지 남아있는 여유 시간에 대하여 VTSO가 느끼는 위험 정도에 미치는 영향을 함께 고려하여 식(3.8)과 같이 구한다.

$$T_{ij} = R_{at}(t_i) + R_{at}(t_j) \quad (3.8)$$

R_{at} : 선박 간 접근시간 위험값, 식(3.5)

t_i : i 선박 주요 및 세부 요인이 여유 시간에 미치는 영향

t_j : j 선박 주요 및 세부 요인이 여유 시간에 미치는 영향

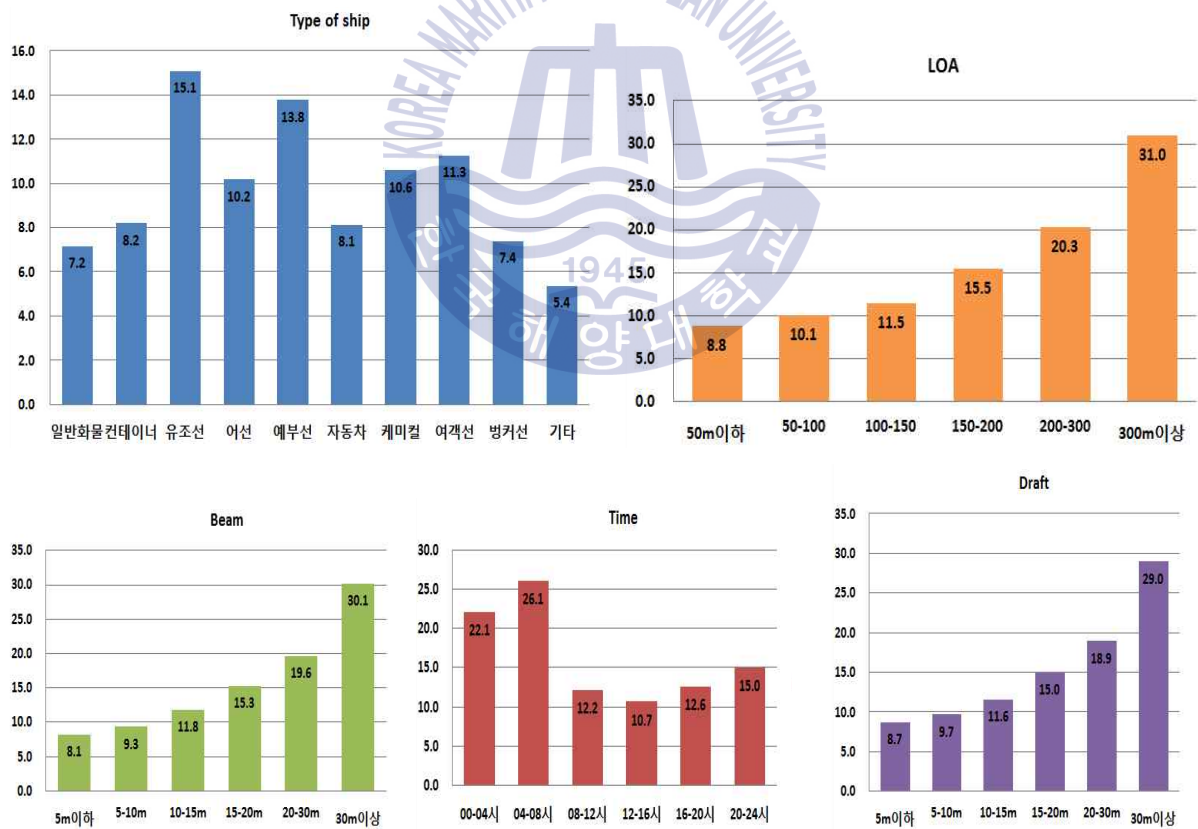
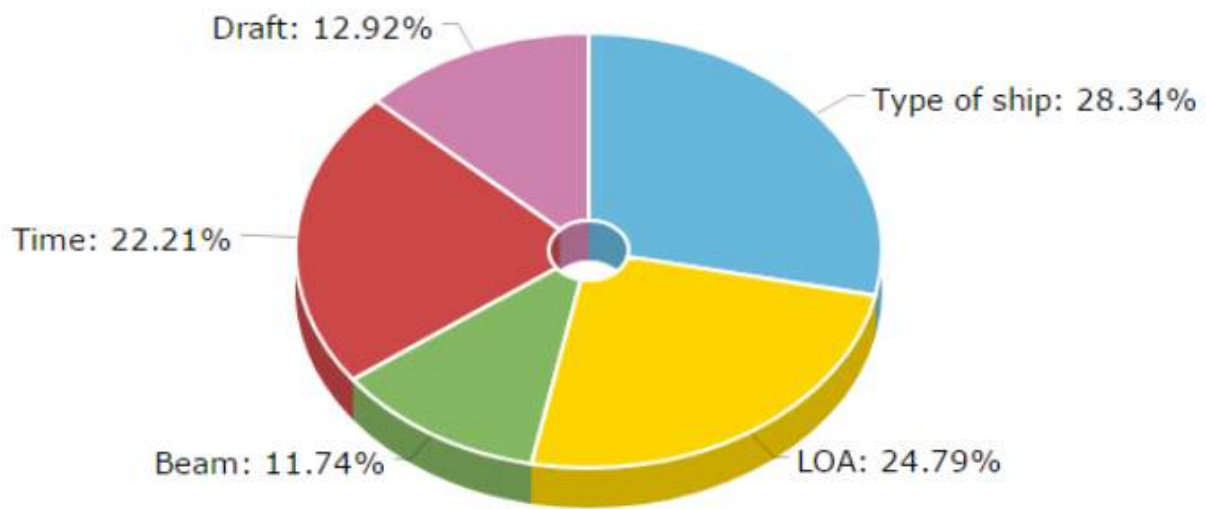


Fig. 3.17 The effect of main and detail factors

3.4 선박 간 근접 거리에 따른 위험지수

VTSO는 선박 동정을 모니터링하며 선박 간 근접 위험을 판단하는 방법으로 선박 벡터가 한 지점으로 수렴되거나 VTS 시스템에서 CPA가 0에 가까울 때 양 선박이 쌍방 교신, 변침 등 적절한 조치 없이 계속 접근하면 이를 충돌 위험 상황으로 인지한다.

그러나 이는 선박의 크기 등을 고려하지 않은 선박 벡터만으로 근접 위험을 판단한 것으로 이를 보완하기 위하여 양 선박이 최대로 근접하여 통과하는 상황을 가정할 때 VTSO가 느끼는 최소 안전거리를 선박 길이로 환산한 Ship domain을 구하고, 이를 CPA로 이동시켜 양 선박의 근접 위험을 판단하기 위한 Approach factor를 구하고 선박 간 근접거리에 따른 위험지수(Risk of approach, A_{ij})를 구하고자 한다.

3.4.1 Ship domain 관련 국내외 연구

기존의 Ship domain과 관련된 연구는 ‘본선을 조종하는 항해사가 타선박이나 장애물의 진입을 허용하지 않는 본선 주위의 일정한 영역(Fujii, 1971)’이라 정의한 이론에 따라 항해사가 본선 주위의 일정한 영역 내로 타선박이 들어오지 않을 때 안전하다고 판단한다.

Fujii는 1960년대 후반 일본 해역을 관측한 결과로 선박을 중심으로 선수미 방향을 장직경, 정횡 방향을 단직경으로 한 타원형(Ellipse)을 Fig. 3.18과 같이 넓은 수역은 장직경 8L, 단직경 3.2L, 좁은 수역은 장직경 6L, 단직경 1.6L로 평균값을 도출하였다.

넓은 수역은 충분한 수역이 갖추어져 있어 선박이 최대 속도(10~16kts)으로 자유롭게 항해할 수 있고 수로에 장애물(섬, 천수 등)이 없는 상태를 말하며, 좁은 수역은 상황에 따라 선박이 감속(6~8kts)하여 진행하여야 하며 마주치는 상황, 추월 및 횡단하는 선박이 없는 좁은 수로나 항내를 말한다(엄한찬 외, 2012).

Coldwell은 제한 수로에서 마주침 상황과 추월 상황에 따른 Domain을 Fig. 3.19와 같이 제안하고(Coldwell, 1983), 국제해상충돌예방규칙이 항해사에게 미치는 영향을 반영하여 마주침 상황에서 선박의 중심을 좌현으로 이동하였다.

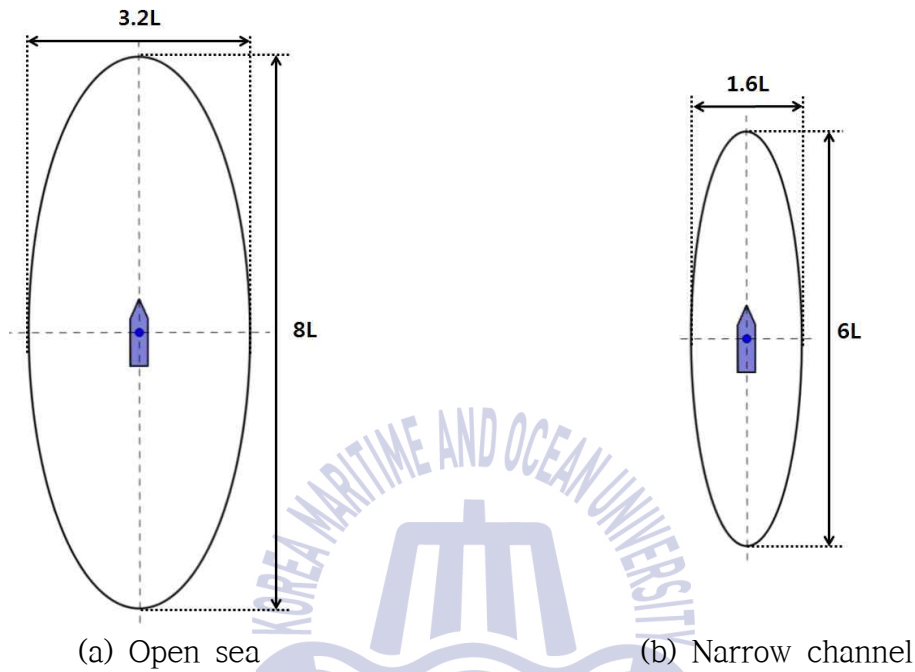


Fig. 3.18 Fujii's domains

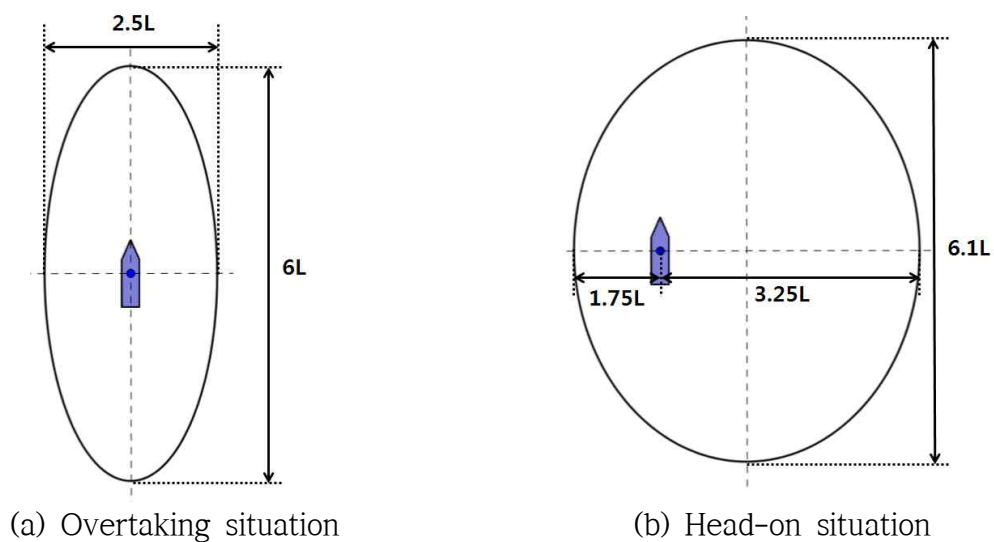


Fig. 3.19 Coldwell's domains

Goodwin은 북해 지역의 선박 교통을 조사하여 레이더 시뮬레이터 충돌 실험 결과 Fig. 3.20과 같이 섹터 형태의 Domain을 제안하였다(Goodwin, 1975). 선박을 중심으로 3 섹터로 나누어 $0^{\circ} \sim 112.5^{\circ}$ 구역은 0.85마일, $112.5^{\circ} \sim 247.5^{\circ}$ 구역은 0.45마일, 그리고 $247.5^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 구역은 0.7마일의 부채꼴 형태이며, COLREG가 항해사에게 미치는 영향을 적용하여 우현이 좌현보다 더 크고 선미 쪽이 가장 작다.

Goodwin이 제안한 Domain은 불연속적인 형태로 컴퓨터 시뮬레이션 실행 시 적합하지 않아 Davis는 이들 섹터의 거리를 합쳐 원을 만들어 선박의 중심 위치를 이동하고, 항해사가 충돌 회피 동작을 취할 수 있는 시간을 결정하기 위해 Arena 개념을 제안하였다(Davis et al., 1980, 1982).

Arena는 Fig. 3.21과 같이 자선의 Ship domain보다 큰 영역으로 타 선박이 이 영역에 들어올 때 이 선박이 자선의 Ship domain을 침범하는지에 따라 항해사의 행동을 결정한다. 만약 Arena에 있는 타 선박이 자선의 Ship domain을 침범하는 침로와 속력일 경우 항해사는 피항 조치를 하게 된다.

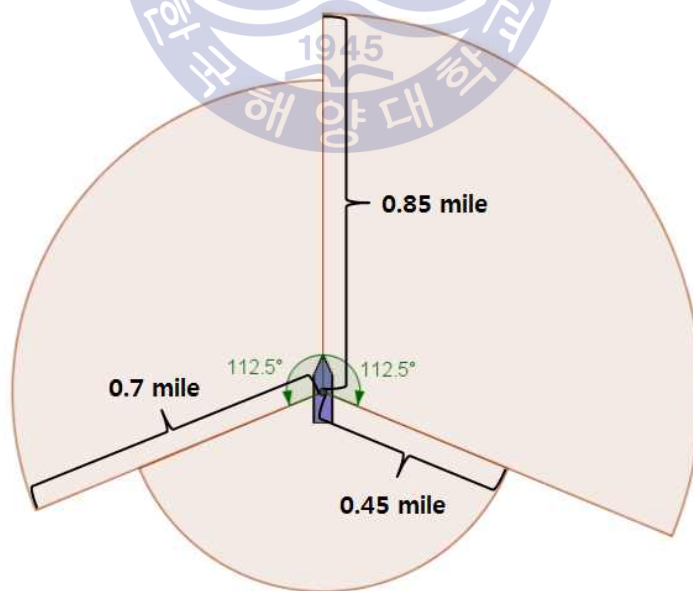


Fig. 3.20 Goodwin's Domain

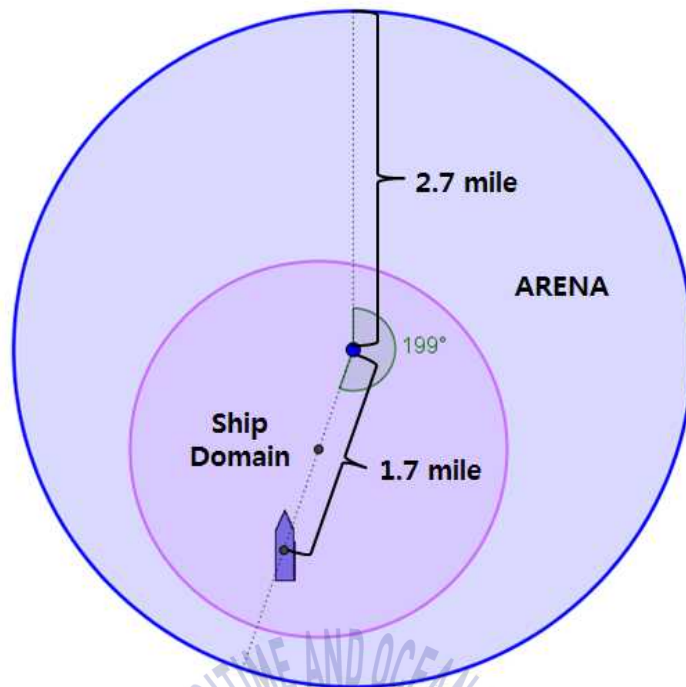


Fig. 3.21 Davis' s Domain (Arena)

좁은 수역에서의 Ship domain과 관련한 최근 연구에서 일본 선박 운항자의 의식 설문조사 결과, 타선의 침입을 허용하고 싶지 않은 영역인 한계 항과거리와 이 이상 이격하여 항과하면 충분히 안심할 수 있는 충분 항과거리를 Table 3.7과 같이 구하였다(Inoue, 2013). 여기서, L_t 는 타선의 길이를, L_o 는 자선의 길이를 의미한다.

Table 3.7 Japanese OoW' s ship domain in narrow waters

| 방 향 | 한계 항과거리 | 충분 항과거리 |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| 선수미 방향 항과거리(FA) | $(0.015L_t + 2.076)L_o$ | $(0.025L_t + 3.125)L_o$ |
| 좌우 방향 항과거리(SP) | $(0.008L_t + 0.667)L_o$ | $(0.012L_t + 1.096)L_o$ |

우리나라 선박 운항자의 통항에 필요한 최소 안전 이격 거리는 식(3.9) 및 (3.10)과 같고, 시정이 양호한 주간의 경우 장직경 7.5L, 단직경 5.2L로 제시하고 있다(Park et al., 2010).

$$Fore = 4.41(\pm 1.84)L, \quad Aft = 3.31(\pm 1.23)L \quad (3.9)$$

$$S_{PB} = 2.62(\pm 1.16)L, \quad S_{SB} = 2.61(\pm 1.16)L \quad (3.10)$$

여기서, *Fore*은 선수장직경, *Aft*는 선미장직경, *S_{PB}*는 좌현단직경, *S_{SB}*는 우현단직경을 의미한다.

이와 같이 Safety domain과 관련하여 많은 연구가 진행되고 있고, 주요 Safety domain을 선박 길이 100m로 가정하여 그리면 Fig. 3.22와 같다.

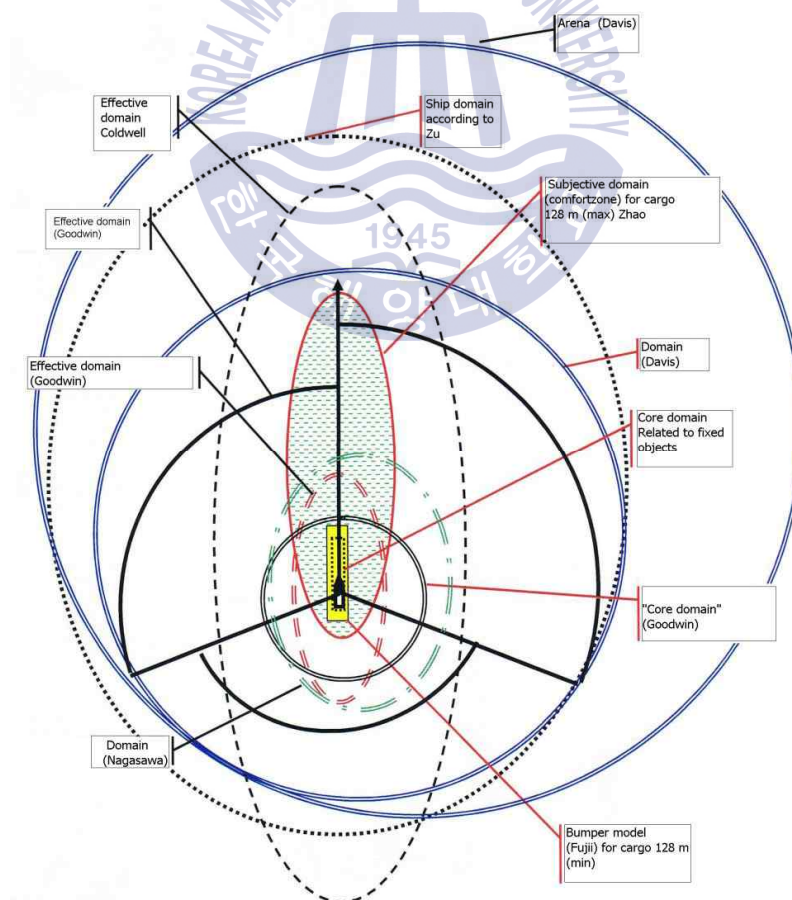


Fig. 3.22 Vessel safety domains for approximately 100m of LOA (PIANC Report, 2014)

3.4.2 VTSO의 Safety domain

우리나라 VTSO의 최소 안전거리(Safety domain)를 선박 길이로 환산할 때 어느 정도의 거리를 안전하다고 생각하는지 알기 위하여 설문을 하였다.

교통 환경은 항만에 인접한 연안 해역을 기준으로 선박이 최대로 근접하여 통과하는 상황을 가정할 때, 응답한 VTSO 개인의 안전거리를 선박 길이로 환산하여 표시한 결과는 Fig. 3.23과 같고, 각 방위별 평균, 표준편차, 95% 신뢰구간은 Table 3.8과 같았다.

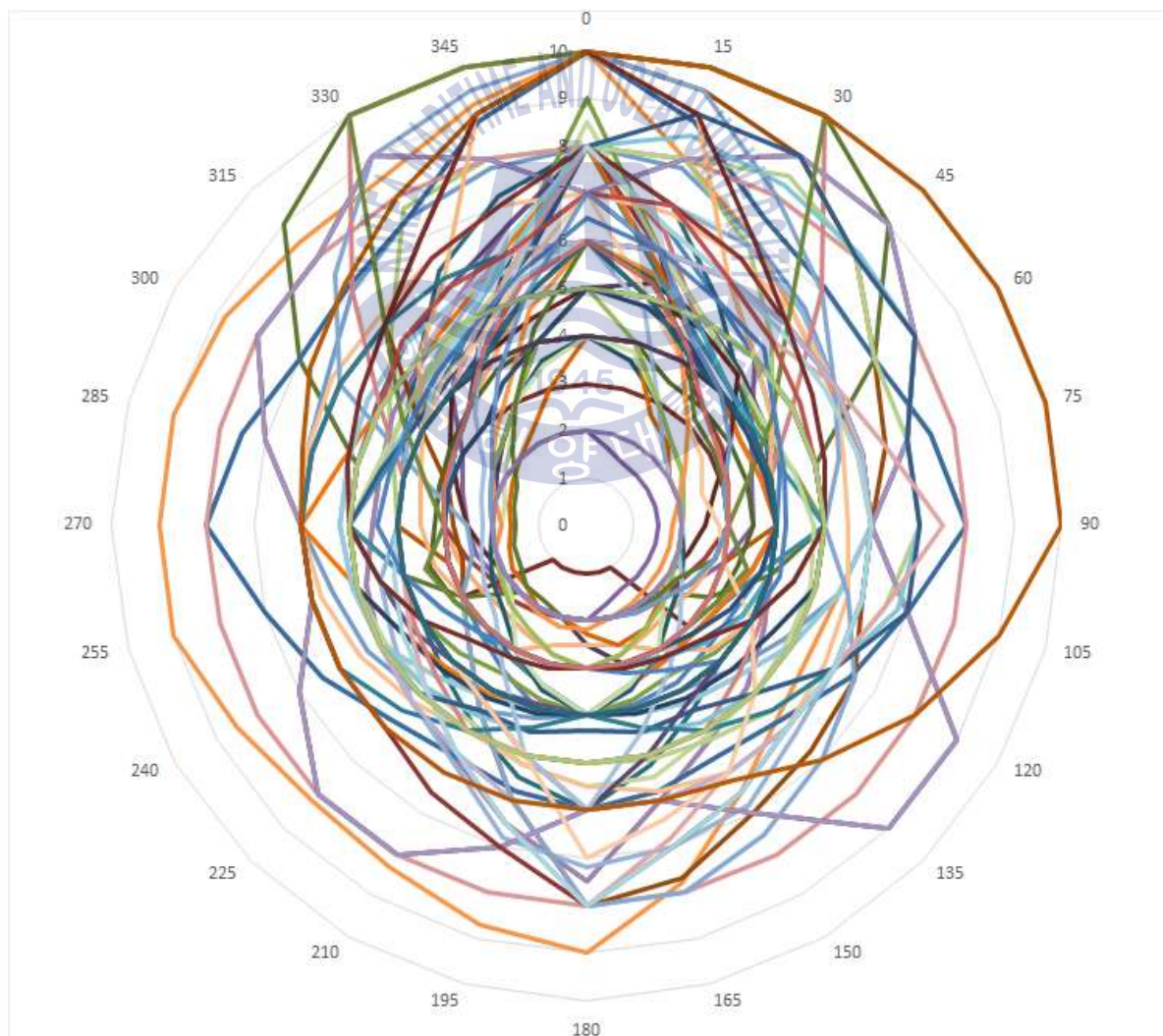


Fig. 3.23 Safety domains of VTSO

Table 3.8 The result of one sample T-test for survey (N=70)

| Bearing | Mean | Std. Dev. | 95% Con. | | Bearing | Mean | Std. Dev. | 95% Con. | |
|---------|-------|-----------|----------|-------|---------|-------|-----------|----------|-------|
| | | | Lower | Upper | | | | Lower | Upper |
| 000° | 6.885 | 2.037 | 6.400 | 7.372 | 180° | 4.490 | 1.927 | 4.031 | 4.949 |
| 015° | 6.274 | 1.916 | 5.817 | 6.731 | 195° | 4.250 | 1.690 | 3.847 | 4.653 |
| 030° | 5.631 | 2.018 | 5.150 | 6.113 | 210° | 4.063 | 1.605 | 3.680 | 4.446 |
| 045° | 5.107 | 1.868 | 4.662 | 5.552 | 225° | 3.966 | 1.606 | 3.583 | 4.349 |
| 060° | 4.760 | 1.757 | 4.341 | 5.179 | 240° | 4.011 | 1.547 | 3.642 | 4.380 |
| 075° | 4.576 | 1.712 | 4.167 | 4.984 | 255° | 4.063 | 1.559 | 3.691 | 4.435 |
| 090° | 4.566 | 1.736 | 4.152 | 4.980 | 270° | 4.167 | 1.658 | 3.772 | 4.562 |
| 105° | 4.419 | 1.658 | 4.023 | 4.814 | 285° | 4.187 | 1.608 | 3.804 | 4.570 |
| 120° | 4.330 | 1.719 | 3.920 | 4.740 | 300° | 4.391 | 1.623 | 4.004 | 4.779 |
| 135° | 4.239 | 1.687 | 3.836 | 4.641 | 315° | 4.736 | 1.685 | 4.334 | 5.138 |
| 150° | 4.197 | 1.631 | 3.808 | 4.586 | 330° | 5.337 | 1.926 | 4.878 | 5.796 |
| 165° | 4.303 | 1.714 | 3.894 | 4.711 | 345° | 6.029 | 1.903 | 5.575 | 6.482 |

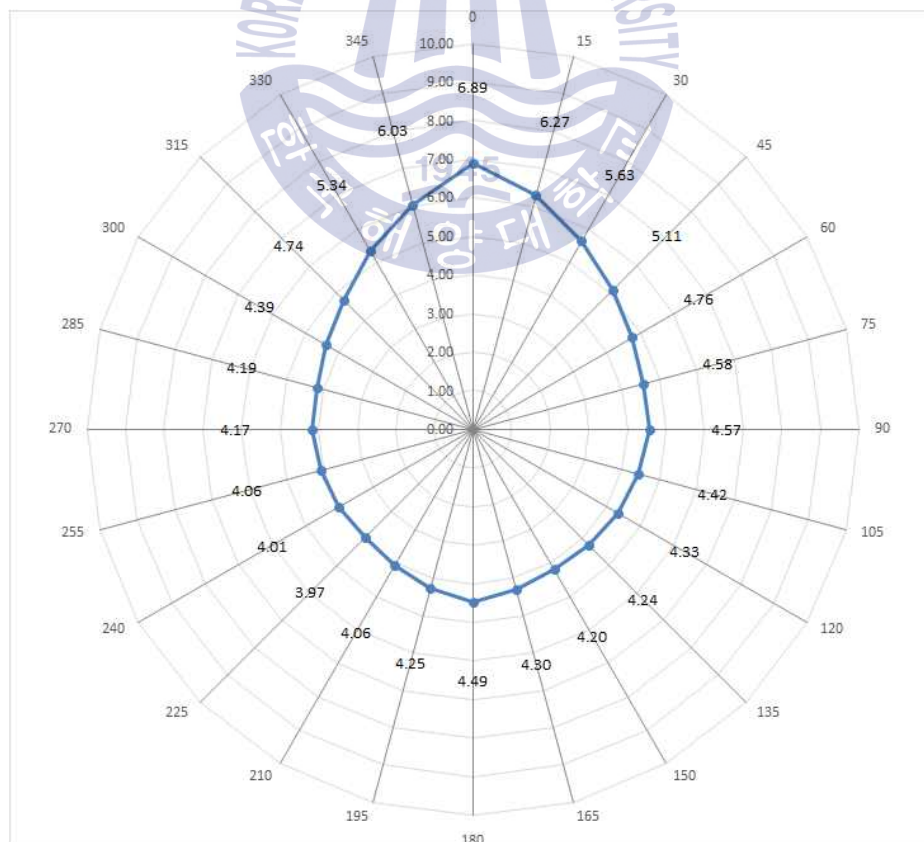


Fig. 3.24 Mean of VTSO' s safety domain

Fig. 3.24는 VTSO의 평균 Domain을 나타낸 것으로, 장직경 $11.3L(\pm 0.95)$, 단직경 $8.7L(\pm 0.87)$ 로 선박의 중심이 좌현 선미 방향으로 이동한 타원형으로 나타났다. 이는 Coldwell, Goodwin 등과 같이 COLREG가 선박 통항에 미치는 영향이 반영된 것으로 판단된다.

이처럼 설문 자료를 기초로 VTSO의 Safety domain을 Fig. 3.25와 같이 제안한다. 여기서,

$a = 5.7L$ (Domain의 장축),

$b = 4.35L$ (Domain의 단축),

$\Delta a = 1.2L$ (선박의 위치를 Domain 중심에서 선미로 이동한 거리),

$\Delta b = 0.2L$ (선박의 위치를 Domain 중심에서 좌현으로 이동한 거리).

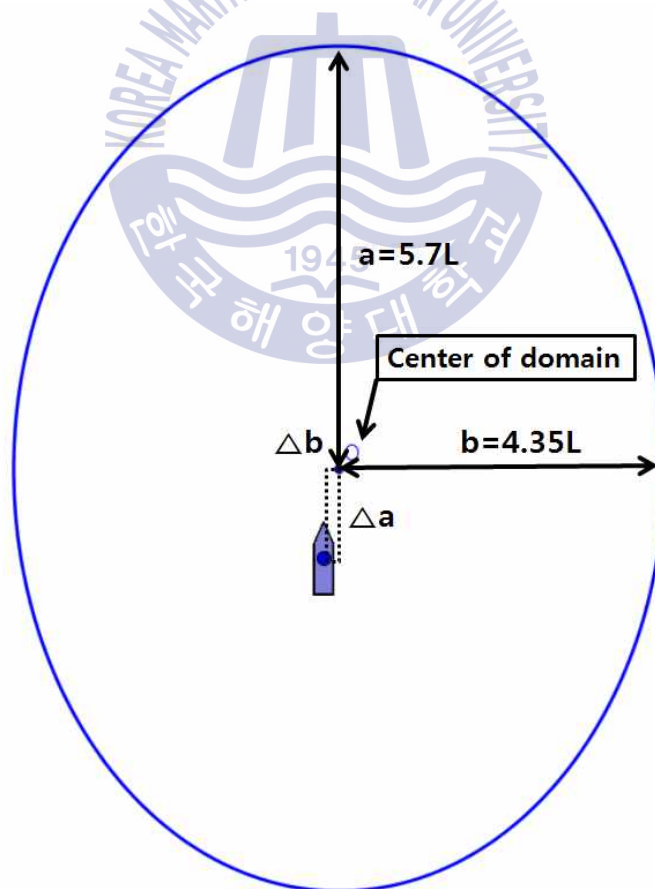


Fig. 3.25 Proposed the safety domain of VTSO

Safety domain은 선박의 위치, 길이 그리고 침로에 따라 변경되므로 i 선박의 위치를 (x_i, y_i) , 선박 길이는 L_i , 침로는 Co_i 라 하면 Safety domain을 좌표에 표시하기 위한 유도과정은 식(3.11)과 같다.

(x_i, y_i) 에서 Δa_i , Δb_i 만큼 이동한 위치를 (x'_i, y'_i) 라 하면,

$$(x'_i, y'_i) \text{이 중심인 타원 방정식은 } \frac{(x'_i)^2}{(a_i)^2} + \frac{(y'_i)^2}{(b_i)^2} = 1 \quad (3.11)$$

$$x'_i = x_i + \cos(Co_i) \cdot \Delta a_i + \sin(Co_i) \cdot \Delta b_i$$

$$y'_i = y_i - \sin(Co_i) \cdot \Delta a_i + \cos(Co_i) \cdot \Delta b_i$$

여기서, $a_i = 5.7L_i/1852(\text{m})$, $b_i = 4.35L_i/1852(\text{m})$,

$\Delta a_i = 1.2L_i/1852(\text{m})$, $\Delta b_i = 0.2L_i/1852(\text{m})$ 이다.

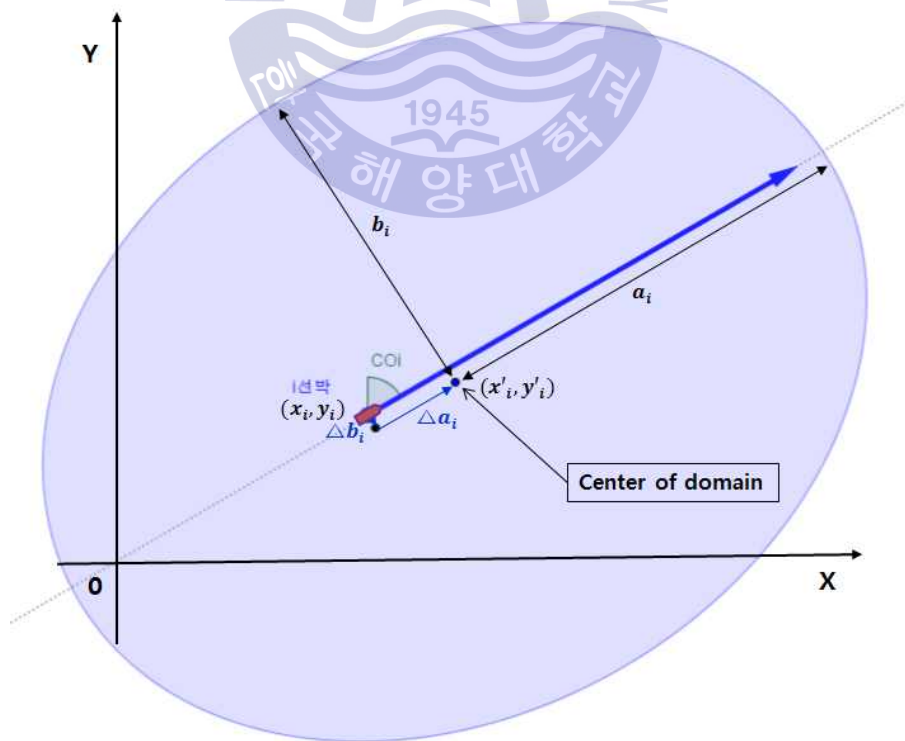


Fig. 3.26 Process of induction for the safety domain

3.4.3 Approach factor에 따른 위험지수

기존 Ship domain 연구는 ‘본선을 조종하는 항해사가 타선박이나 장애물의 진입을 허용하지 않는 본선 주위의 일정한 영역(Fujii, 1971)’이라는 Fujii 이론에 따라 항해사는 본선 주위의 일정한 영역 내로 타선박이 들어오지 않도록 항해를 하면 충돌을 피할 수 있는 시간이 있어 안전하다고 판단하였다.

Fig. 3.27에서 양 선박의 Crossing 상태에서 Ship domain으로 타선박의 진입 여부를 살펴보면, (a)의 좌측은 CPA가 0인 상태에서 충돌 임박까지 5.0분, 우측은 7.5분 남아있으며, 각 선박의 Domain으로 타선박의 간섭이 없다.

(b)의 좌측은 CPA가 0인 상태에서 충돌 임박까지 3.6분, 우측은 6.0분 남아있으며, i 선박과 j 선박의 Domain 바깥에 타선박의 Domain이 겹치기 시작한다.

그리고 (c)는 CPA가 0인 상태에서 충돌 임박까지 2.0분, 우측은 3.3분 남아있으며, i 선박과 j 선박의 Domain으로 타선박이 들어오기 시작한다.

Fig. 3.27의 (a)와 (b)는 i 선박과 j 선박의 Domain으로 타선박이 진입하지 않았지만, 양 선박 모두 충돌 위험을 피할 수 있는 충분한 시간이 있다고 볼 수 없다.

특히 (c)는 각 선박의 Domain으로 타선박이 진입하기 직전인 상황으로 양 선박 간 합의와 적극적인 피항 조치가 없다면 충돌을 피하기 어려운 상황이 전개된다.

이때 각 선박의 Domain은 기존에 연구된 Ship domain보다 큰 영역인 VTSO의 Safety domain을 적용하였다.

이처럼 현재 선박의 위치를 중심으로 한 Ship domain으로 타선박이나 장애물의 진입을 허용하지 않았다고 해서 충돌 위험을 판단하기 어려운 부분이 있어 이를 개선하고자 본 논문에서는 Fig. 3.28과 같이 Domain을 TCPA가 0이 지점, 즉 CPA로 이동하여 각 선박의 Domain과 CPA와의 관계에 따라 위험 여부를 판단하는 방법을 제안하고자 한다.

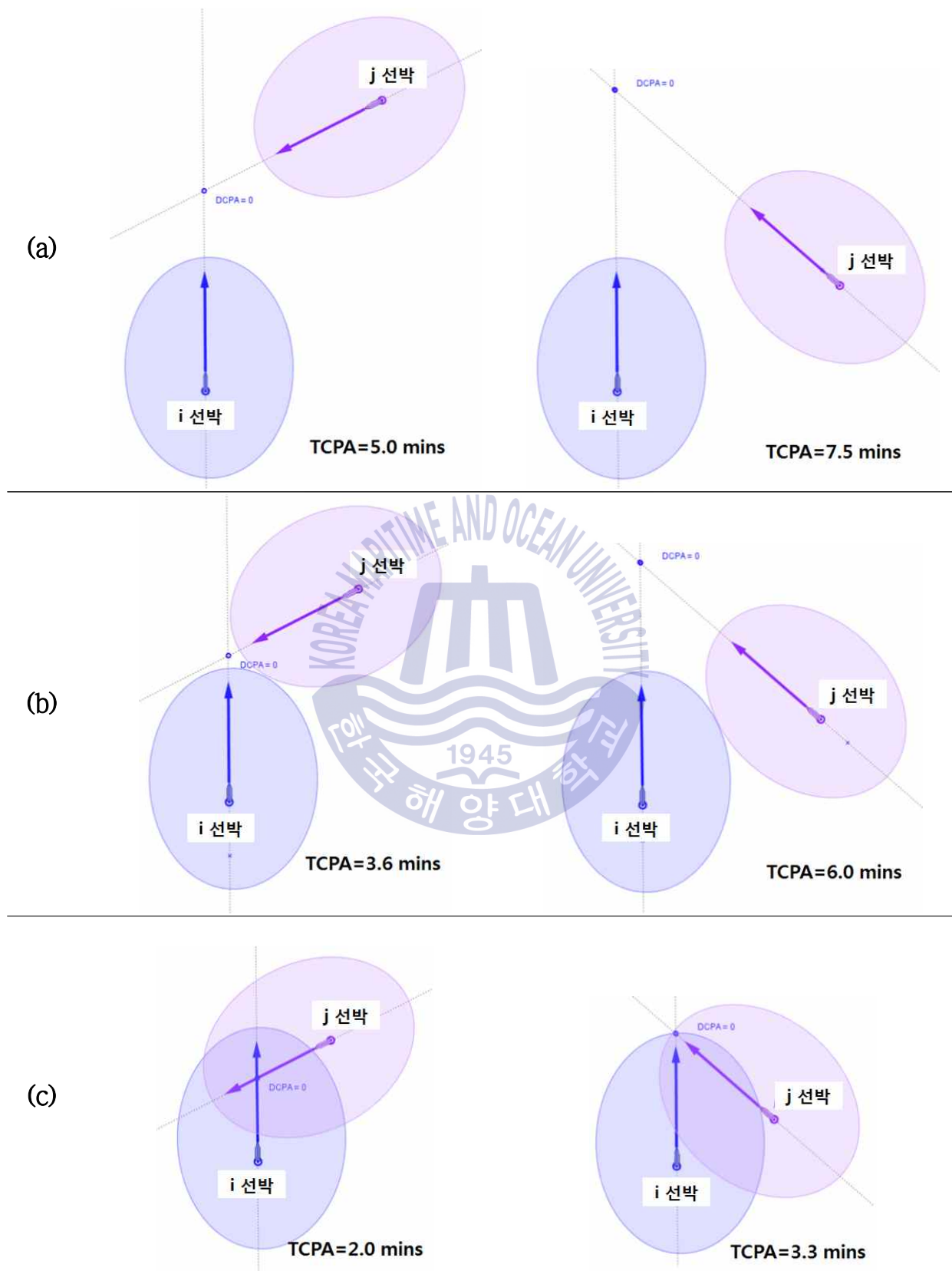


Fig. 3.27 Impact comparison of TCPA and CPA on Ship Domain

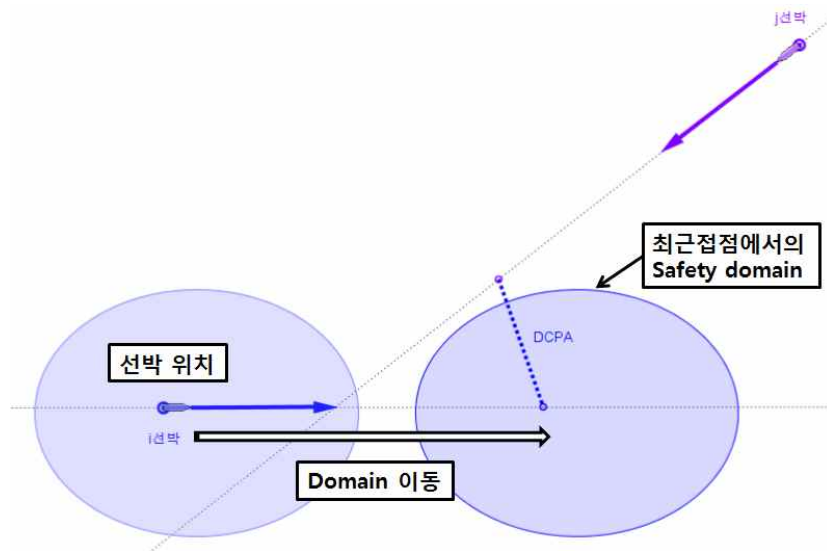


Fig. 3.28 Safety domain on the point of TCPA

Fig. 3.29에서 i 선박의 Domain이 CPA에 위치할 때 양 선박 CPA의 연장선과 i 선박 Domain의 교점까지의 거리를 Ds_i (Safe distance)라 하면, CPA가 Ds_i 보다 크면 양 선박이 충분히 떨어져 안전하고, CPA가 Ds_i 보다 작으면 양선박이 근접하여 위험하다고 판단할 수 있다.

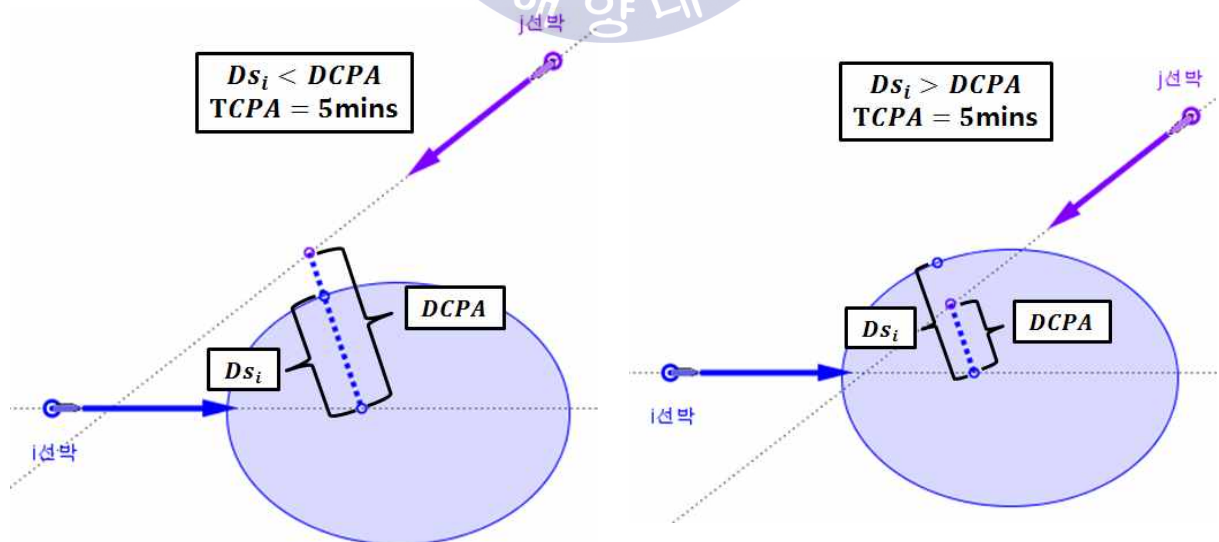


Fig. 3.29 Definition of Approach factor

이와 같이 D_s 와 CPA와의 관계에 따라 양 선박의 근접 위험을 판단할 수 있으며, 이를 Approach factor(f_i)라 정의하고 식(3.12)와 같이 구한다.

$$f_i = DCPA / Ds_i \quad (3.12)$$

f_i : i 선박의 Approach factor

Ds_i : i 선박의 Domain이 CPA에 위치할 때 Safe distance(NM)

식(3.12)을 적용하면 f_i 가 1보다 크면 안전, 1이면 보통 그리고 1보다 작으면 위험하다고 판단할 수 있다.

설문조사를 통하여 VTSO 개인이 응답한 Domain 선상에 타선박이 존재할 때 느끼는 위험 정도(최대 1.0)를 조사한 결과, 평균 0.657(표준편차 0.1, 95% 신뢰 구간 0.631~0.682)로 조사되었다.

$f_i=1$ 일 때, 즉 Domain 선상에 타선박이 존재할 때 VTSO가 느끼는 위험 정도 평균(0.657)과 유사한 값을 가지는 sech함수는 위험 정도에 따른 기울기 계수(k)가 1.0인 함수이며, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 3.30과 같고 식(3.13)과 같이 구한다.

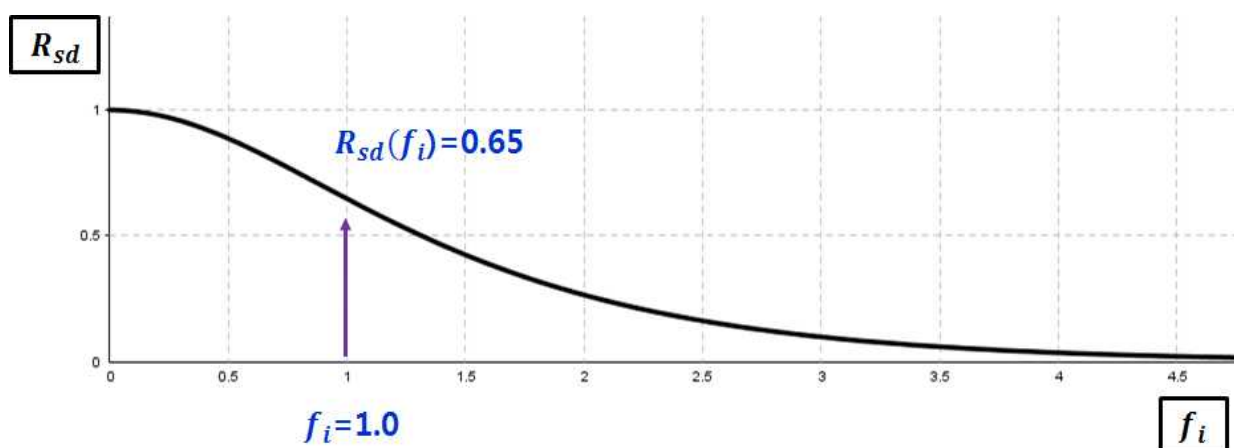


Fig. 3.30 A Graph of the Risk of Safety domain(R_{sd})

$$R_{sd}(f_i) = \text{sech}(k \cdot f_i) \quad (3.13)$$

R_{sd} : 선박의 근접 위험값

f_i : i 선박의 Approach factor

k : 위험 정도에 따른 기울기 계수

식(3.13)은 i 선박의 Approach factor에 따른 i 선박의 근접 위험값(Risk of safety domain, R_{sd})이며, 선박 간 근접거리에 따른 위험지수(Risk of Approach, A_{ij})는 양 선박 R_{sd} 의 합으로 식(3.14)와 같이 구한다.

$$A_{ij} = R_{sd}(f_i) + R_{sd}(f_j) \quad (3.14)$$

A_{ij} 는 i 선박과 j 선박의 선박 길이를 고려한 근접거리에 따른 위험을 나타내며, CPA가 0일 때 최대 위험 2.0이 된다.

3.4.4 Safety domain을 이용한 위험지수의 검증

A_{ij} 는 양 선박이 CPA에 도달할 때 CPA에서의 각 선박 Safety domain으로 상대 선박이 얼마나 근접하는지를 미리 계산하므로 선박의 변침에 따라 CPA가 바뀌면 위험값도 달라진다.

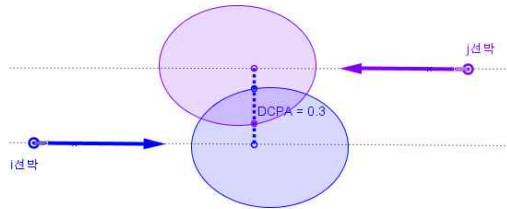
양 선박의 조우 상황에 따라 A_{ij} 의 값의 변화를 분석하기 위하여 각 선박 길이(L)를 100m에서 200m, CPA를 0.3마일에서 0.1마일로 Fig. 3.31부터 Fig. 3.34까지와 같이 비교하였다.

Fig. 3.31은 Head-on 상태에서 양 선박이 좌현 대 좌현, 우현 대 우현으로 통과하는 상황이며, Fig. 3.32는 Crossing 상태에서 조우각 045°, Fig. 3.33은 조우각 090°, 그리고 Fig. 3.34는 조우각 135°로 피항선이 유지선의 선미로 통과하는 상황을 각각 비교하였다.

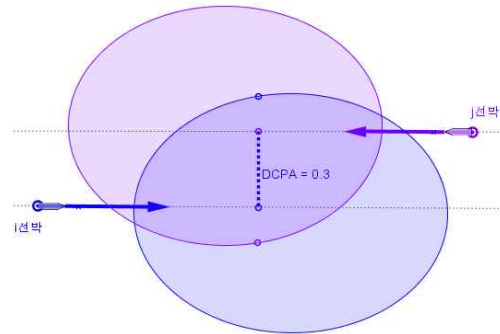
Table 3.9는 각 상황에 대한 f_i , f_j , $R_{sd}(f_i)$, $R_{sd}(f_j)$, 그리고 A_{ij} 을 구한 것이다.

L=100m

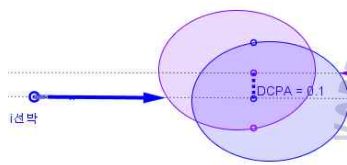
L=200m



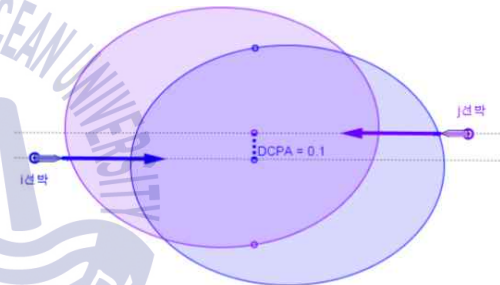
(a)



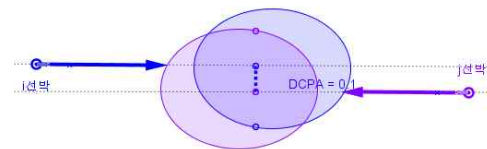
(b)



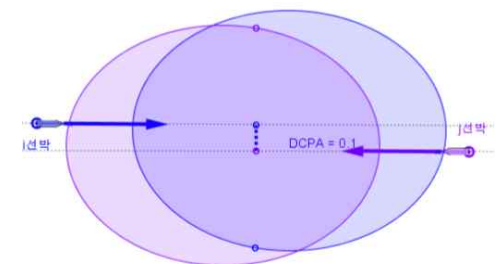
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 3.31 Predicted violation of the safety domain in head-on situation

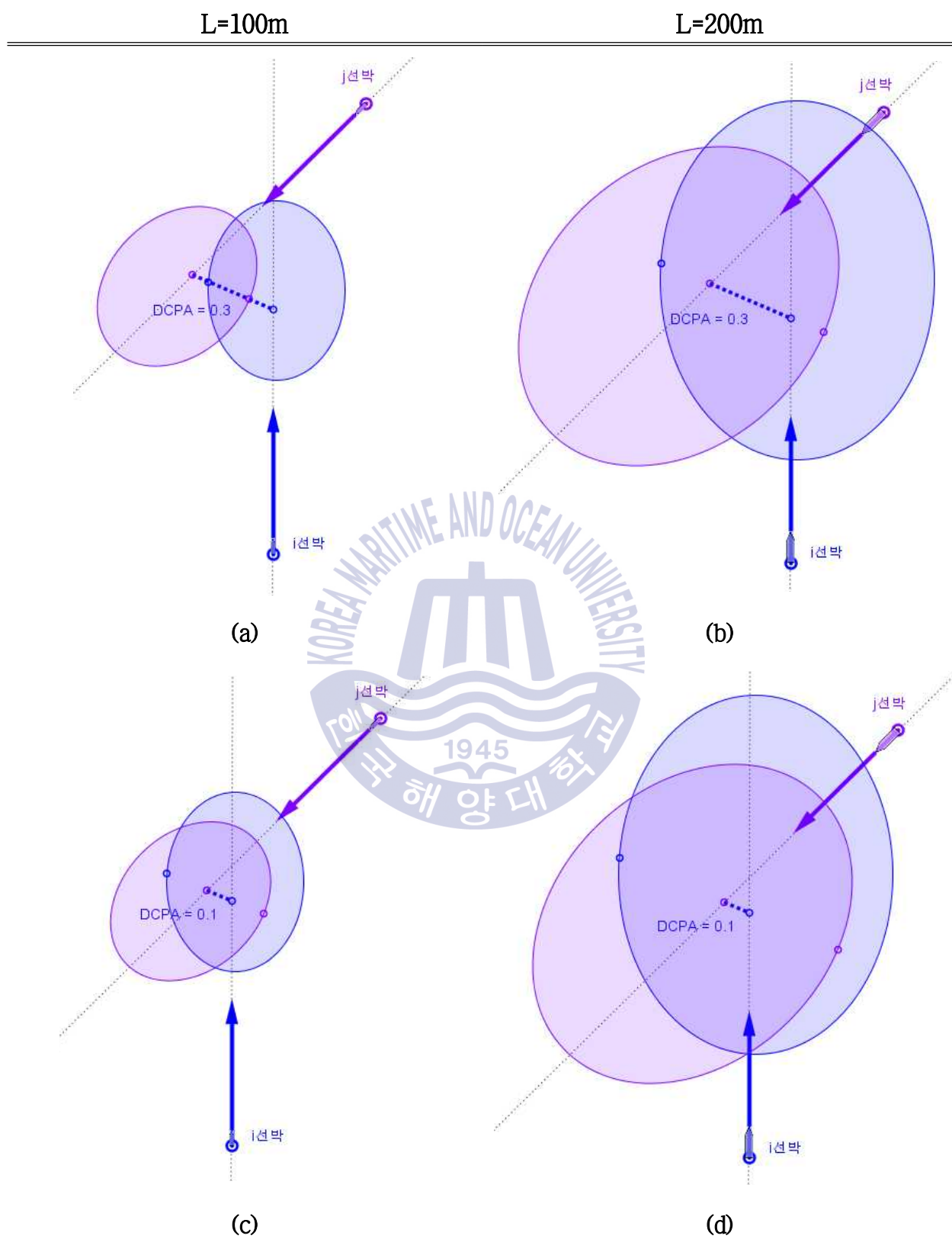


Fig. 3.32 Risk of Approach(A_{ij}) in Crossing situation (Stbd 045°)

L=100m

L=200m

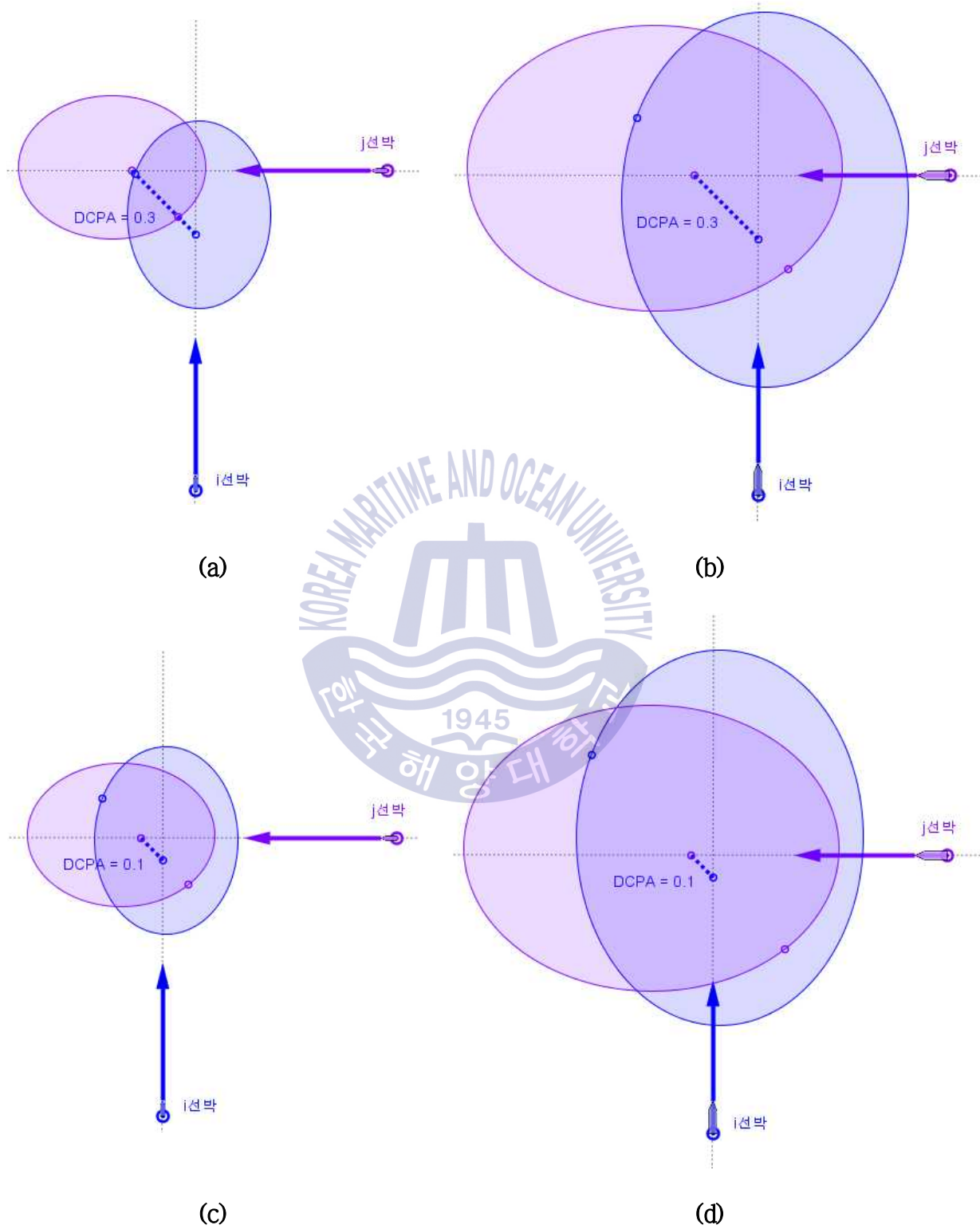


Fig. 3.33 Risk of Approach(A_{ij}) in Crossing situation (Stbd 095°)

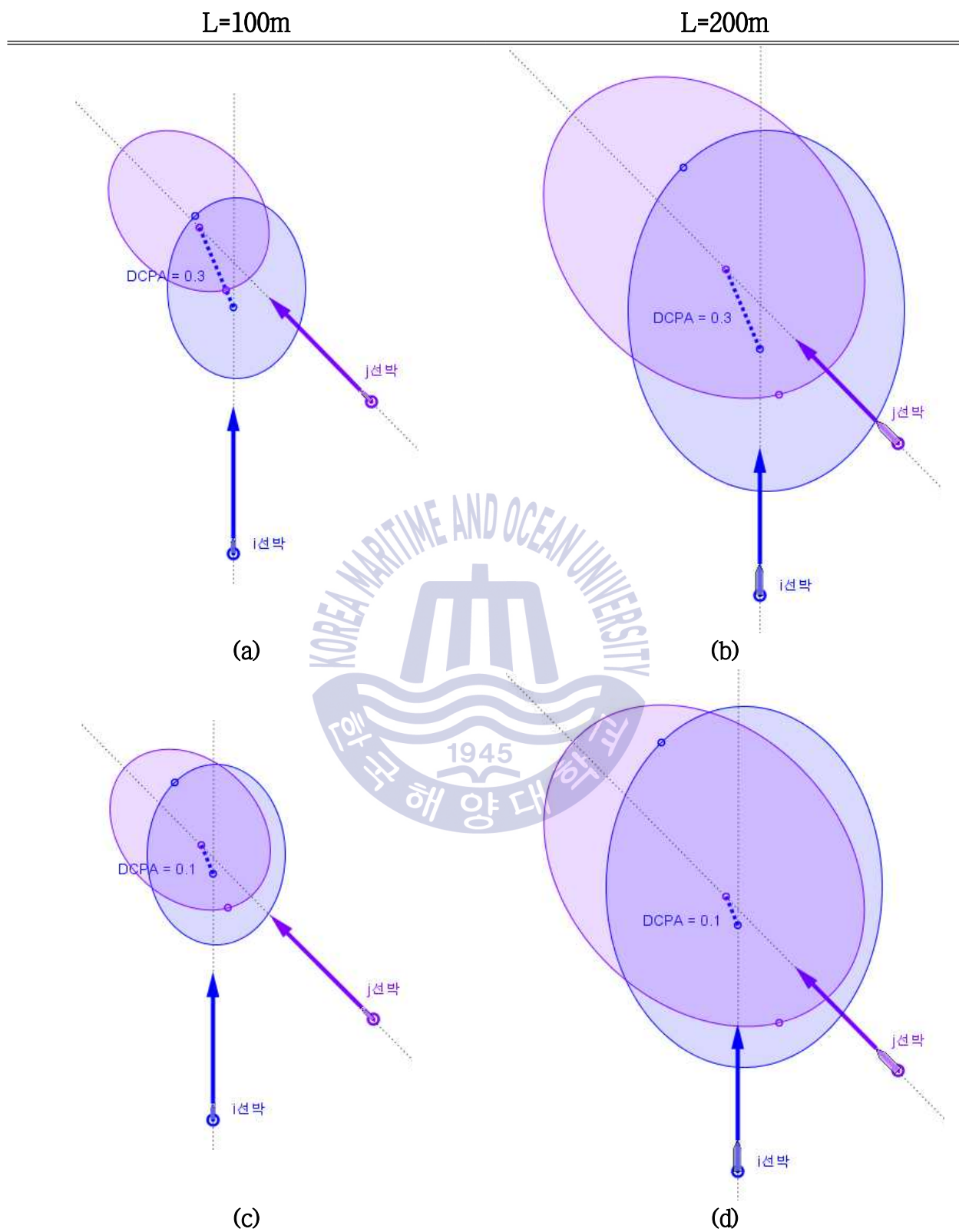


Fig. 3.34 Risk of Approach(A_{ij}) in Crossing situation (Stbd 135°)

Table 3.9 Example calculation of A_{ij}

| Fig. | | f_i | f_j | $R_{sd}(f_i)$ | $R_{sd}(f_j)$ | A_{ij} |
|------|-----|-------|-------|---------------|---------------|----------|
| 3.31 | (a) | 1.35 | 1.35 | 0.49 | 0.49 | 0.97 |
| | (b) | 0.68 | 0.68 | 0.81 | 0.81 | 1.62 |
| | (c) | 0.47 | 0.47 | 0.90 | 0.90 | 1.81 |
| | (d) | 0.24 | 0.24 | 0.97 | 0.97 | 1.95 |
| | (e) | 0.41 | 0.41 | 0.92 | 0.92 | 1.84 |
| | (f) | 0.21 | 0.21 | 0.98 | 0.98 | 1.96 |
| 3.32 | (a) | 1.24 | 1.41 | 0.54 | 0.46 | 1.00 |
| | (b) | 0.62 | 0.70 | 0.84 | 0.79 | 1.63 |
| | (c) | 0.43 | 0.49 | 0.91 | 0.89 | 1.81 |
| | (d) | 0.21 | 0.24 | 0.98 | 0.97 | 1.95 |
| 3.33 | (a) | 1.04 | 1.36 | 0.63 | 0.48 | 1.11 |
| | (b) | 0.52 | 0.68 | 0.88 | 0.81 | 1.68 |
| | (c) | 0.37 | 0.48 | 0.94 | 0.90 | 1.84 |
| | (d) | 0.18 | 0.24 | 0.98 | 0.97 | 1.96 |
| 3.34 | (a) | 0.88 | 1.29 | 0.71 | 0.51 | 1.22 |
| | (b) | 0.44 | 0.64 | 0.91 | 0.82 | 1.73 |
| | (c) | 0.31 | 0.45 | 0.95 | 0.91 | 1.86 |
| | (d) | 0.15 | 0.23 | 0.99 | 0.98 | 1.96 |

Fig. 3.31의 (a)와 (b)는 양 선박의 CPA가 0.3마일, (c)와 (d)는 CPA가 0.1마일로 좌현 대 좌현으로 통과하는 경우이며, 선박 길이가 100m(a와 c)에서 200m(b와 d)로 바뀔 때 각각의 A_{ij} 는 (a)가 0.97, (b)가 1.61, (c)가 1.81, (d)가 1.95로 선박 길이가 길어지고 CPA가 가까워질수록 값이 커진다. 여기서 (a)는 양 선박의 Approach factor가 1.35로 1보다 크고 A_{ij} 는 1 이하로 근접 거리에 따른 위험은 보통 수준으로 판단된다.

Fig. 3.31의 (e)와 (f)는 CPA가 0.1마일로 우현 대 우현으로 통과하는 상황이며, A_{ij} 는 각각 1.84, 1.96으로 (c)와 (d)보다 약간 높게 나타났다. 이는 Safety domain의 중심이 선박 위치에서 Δb 만큼 치우쳐 있기 때문이다.

Fig. 3.32의 (a)와 (b)는 양 선박의 CPA가 0.3마일, (c)와 (d)는 CPA가 0.1마일로 조우각 045° 로 피항선이 유지선 선미로 통과하는 경우이며, 선박 길이가 100m(a와 c)에서 200m(b와 d)로 바뀔 때 각각의 A_{ij} 는 (a)가 1.00, (b)가 1.63, (c)가 1.81, (d)가 1.95로 선박 길이가 길어지고 CPA가 가까워질수록 값이 커진다.

이는 Fig. 3.33과 3.34의 상황에서도 마찬가지로 선박 길이가 길고 CPA가 가까워질수록 위험지수 A_{ij} 가 더 높아졌으며, 특히 선박 길이보다 CPA가 가까워질수록 위험지수 A_{ij} 의 변화가 더 커짐을 알 수 있다.

또한, 각 그림의 (a)는 각 선박의 선박 길이와 속력, CPA가 같은 상황으로 Head-on 상태(좌현 대 좌현)에서 조우각이 우현으로 045° , 090° , 135° 로 점점 커질수록 A_{ij} 는 $0.97 \rightarrow 1.00 \rightarrow 1.11 \rightarrow 1.22$ 로 점점 커진다. 이는 j 선박이 i 선박 Domain으로 점점 침범하면서 f_i 값이 점점 작아지고 $R_{sd}(f_i)$ 가 커지면서 A_{ij} 가 증가하기 때문이다.

결과적으로 선박 위치가 Safety domain 중심에서 좌현으로 $\Delta b(0.2L)$, 선미 방향으로 $\Delta a(1.2L)$ 만큼 이동하여 같은 CPA 상황이라 하여도 각 선박의 Domain으로 상대 선박이 침범하는 방향과 거리에 따라 위험도가 달라지고, 선박 길이가 길수록 Domain을 침범하는 비율이 커져 위험도가 높아짐을 알 수 있다.

제 4 장 VTSO 위험 태도에 따른 충돌 위험도 평가모델 개발

지금까지 VTSO 관점에서의 선박 충돌 위험도 평가 모델 개발을 위해 실시한 설문조사에서 선박 조우 상황에 따른 위험지수(E_{ij})를 검증하고, 선박 간 최단 접근시간에 따른 위험지수(T_{ij}) 그리고 선박 간 근접거리에 따른 위험지수(A_{ij})를 식별하여 충돌 위험지수(RI)를 구하였다.

그러나 설문 분석 결과, 같은 선박 교차 상황이라도 VTSO 개인에 따라 위험성을 판단하는 데 있어서 차이가 있음을 확인하였다.

따라서 이를 구분하기 위하여 위험 인식과 관련된 국내외 연구를 살펴보고, 특정한 의사결정의 결과가 불확실성 혹은 위험에 대처하는 개인의 태도에 따라 만족도가 달라지는 의사결정자의 위험 태도에 따른 효용성과 관련된 연구(Ang AH-S & Tang WH, 1984)에서 RI 에 대한 VTSO의 위험 태도에 따른 충돌 위험도 평가모델($CoRI$)을 구하였다.

4.1 위험 인식과 위험 태도

위험은 크게 세 가지 요소 바람직하지 않은 결과, 발생 가능성, 현실 상황 인식에 의해 형성된다(Renn, 1992). 즉, 위험은 대체로 부정적인 영향과 그것이 일어날 발생 가능성에 의해 결정되지만, 위험 주체가 현실을 어떻게 인식할 것인가에 따라 다르게 해석될 수 있다. 위험을 보는 정의, 관점, 패러다임이 다양한 것은 이러한 위험을 보는 현실 상황 인식에서 차이를 보이기 때문이다(김영욱, 2014).

개인의 위험 수용과 관련한 연구들은 필연적으로 전문가의 시각과 일반인의 위험 인식 사이에서 어떻게 가중치를 둘 것인가와 연결되어 있으며, 효율적인 공중 참여와 사회 가치와도 연결되어 있다. 일반적으로 위험 인식 연구를 참조하면 발생 확률이 낮더라도 재앙의 가능성이 높은 위험을 수용하기는 힘들다. 하지만 이러한 위험은 전문가 시각에서 보면 수용 가능한 위험이 되기도 한다(김영욱, 2014).

위험 인식에 영향을 미치는 변수로 개인의 통제성, 편익 정도, 자발성, 공정성, 주체의 신뢰성, 익숙함 정도, 사람의 실수 여부, 재앙의 가능성 등으로 나누기도 한다(Fishhoff, Lichtenstein, Slovic, Derby & Keeney, 1981).

한편 위험 인식에 영향을 미치는 세 가지 요소로 통제력, 정보, 대응 시간을 들기도 한다(MacCrimmon & Wehrung, 1986).

위험을 둘러싼 의사 결정은 객관적인 수치를 단순 비교하는 방법에서, 효용성을 계산하는 방법, 그리고 선호의 역전 현상을 설명하는 것으로 발전해 왔다(Bazerman & Moore, 2008).

예상 이론은 사람들이 의사 결정을 할 때, 기준점(reference point)을 활용한다는 것을 설명한다. 따라서 기준점을 어디에 잡느냐에 따라 선호는 역전될 수 있다. 예상 이론의 유명한 실험에 따르면, 600명이 사망할 것으로 예상되는 질병에 맞서는 프로그램을 제안했는데, “프로그램 A가 채택되면 200명을 살릴 수 있고”, “프로그램 B가 채택되면 600명을 살릴 수 있는 확률이 1/3이고, 아무도 살릴 수 없는 확률이 2/3일 때”, 사람들 대다수가 프로그램 A를 선택하였다. 반면에 다른 실험에서 “프로그램 C가 채택되면 400명이 사망하고”, “프로그램 D가 채택되면 아무도 사망하지 않을 확률이 1/3이고, 600명이 죽을 확률이 2/3이라고 했을 때”, 대부분의 사람은 프로그램 D를 선택하였다. 이때 사람들은 생각의 기준점을 어디에 두느냐에 따라 다른 결정을 한다(김영옥, 2014).

첫 번째 실험에서는 획득의 정도로 보면 아무것도 가지고 있지 않았던 상태를 기준점으로 하여 확실하게 획득할 수 있는 프로그램을 선호하는 경향을 보인다. 하지만 두 번째 실험에서는 손실 정도로 보면 모든 것을 다 가지고 있던 상태를 기준점으로 하여 손실을 줄일 방법은 무엇인가를 고민하게 된다. 즉, 획득의 상황에서는 위험 회피(Risk averse)를, 손실의 상황에서는 위험 감수(Risk-taking)를 기준으로 의사 결정을 하게 된다. 이렇듯 사람들은 기대 효용의 총합과는 상관없이 제한된 이성과 체험적으로 체득한 어떤 법칙성에 따라 의사를 결정한다(김영옥, 2014).

위험 태도는 Fig. 4.1과 같이 크게 위험 회피(a), 위험 중립(b), 위험 감수형(c)으로 구분한다.

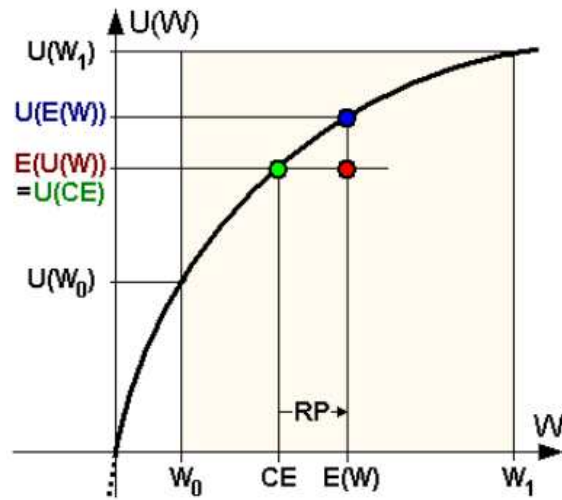
이를 효용성(Utility)의 개념으로 설명하기에 앞서 그래프의 x 축은 불확실성에 대한 대가(Uncertain payment)를 말하고, y 축은 주어진 대가가 개인에게 줄 수 있는 만족도(Utility of money)를 말하며 각 용어에 대한 설명은 Table 4.1과 같다.

먼저, Fig. 4.1(a)의 각 변수값을 $CE=\$40$, $E(W)=\$50$, $E(\$0)=0$, $U(CE)=6$, $E(\$100)=10$ 이라 하면 위험 회피형은 게임에 참가하지 않을 때 6만큼의 효용성을 지니는 $\$40$ 을 가지고 있지만, 게임에 참가했을 때 기대되는 대가의 효용성은 $U(E(W))=6+(4-6)/2=5$ 로 효용성 측면으로 본다면 게임에 참가하지 않는 것이 이익이 된다.

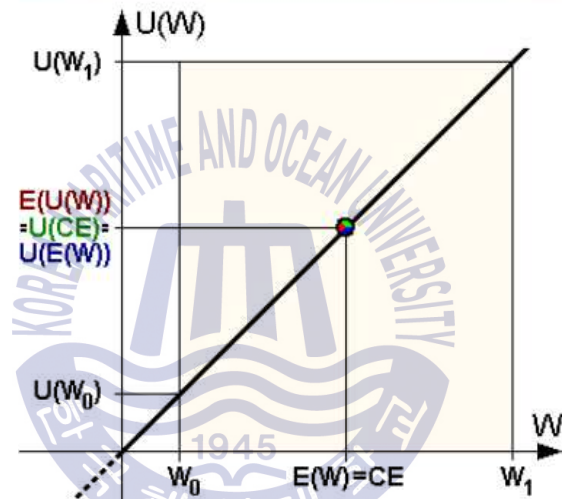
Table 4.1 Explanation of terms of utility(Wikipedia)

| Term | Explanation |
|-----------|--|
| CE | Certainty equivalent 게임에 참가하지 않을 시 확실하게 얻을 수 있는 대가 |
| $E(U(W))$ | Expected value of the utility(expected utility) of the uncertain payment 한 개인에 있어 특정 대가가 지니는 효용성의 평균값을 의미 |
| $E(W)$ | Expected value of the uncertain payment 게임에 참가했을 시 얻을 수 있는 대가의 확률적 기대치 |
| $U(CE)$ | Utility of the certainty equivalent 보장 된 대가가 개인에게 줄 수 있는 만족도(혹은 효용성) |
| $U(E(W))$ | Utility of the expected value of the uncertain payment 불확실한 대가의 기대치가 개인에게 줄 수 있는 만족도(혹은 효용성) |
| RP | Risk premium $E(W)$ 와 비교해보았을 때 개인이 CE를 보장받기 위해 감수할 수 있는 대가의 양 |

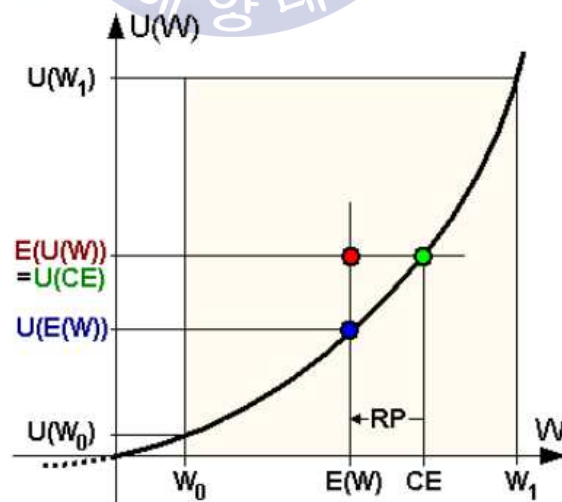
(a)



(b)



(c)



출처 : Wikipedia(http://en.wikipedia.org/wiki/Risk_aversion)

Fig. 4.1 Utility functions of the risk attitude

반면 Fig. 4.1(c)의 각 변수값을 $CE=\$60$, $E(W)=\$50$, $E(\$0)=0$, $U(CE)=4$, $E(\$100)=10$ 이라 하면 위험 감수형은 게임에 참가하지 않을 때 4만큼의 효용성을 가지고 있지만, 게임에 참가했을 때 기대되는 대가의 효용성은 $U(E(W))=4+(6-4)/2=5$ 로 효용성 측면으로 본다면 게임에 참가하는 것이 이득이 된다.

그리고 위험 중립형은 $U(CE)$, $U(E(W))$, $E(U(W))$ 값이 모두 같으므로 게임에 참가하는 것과 참가하지 않은 것 어떤 것을 선택하더라도 \$50이 주는 보편적 만족도와 같은 효용성을 느끼기 때문에 어느 쪽에도 치우치지 않는다.

이에 본 논문에서는 위험 주체의 관점에서 볼 때 VTSO는 선박 충돌을 예방하기 위하여 선박 동정을 모니터링하며 위험을 인지하는 전문가 집단으로, MacCrimmon(1986)의 연구를 참고하면 VTSO의 위험 인식에 영향을 미치는 세 가지 요소로 선박 조우 상황, 접근 거리, 대응시간을 들어 이를 위험지수(Risk Index)라 정의하였다.

또한, 같은 선박 교차 상황이라도 VTSO 개인에 따라 위험성을 판단하는데 차이가 있었고, 설문분석을 통한 평균 위험 정도 즉, 위험지수(RI)에 대한 VTSO 개인이 느끼는 충돌 위험도를 구하기 위하여 의사결정자의 위험 태도에 따른 효용성(Ang AH-S & Tang WH, 1984)을 계산한 식(4.1)을 참고하여 VTSO의 위험 태도에 따른 충돌 위험도 평가모델을 식(4.2)와 같이 구하였다.

$$u(x) = \frac{1}{1 - \exp(-\rho)} [1 - \exp(-\rho \frac{x_{\max} - x}{x_{\max}})] \quad (4.1)$$

u : 기준값(x)에 대한 효용성(Utility)

ρ : 의사결정자의 위험 태도($\rho < 0$: 감수형, $\rho = 0$: 중립형, $\rho > 0$: 회피형)

식(4.1)에서 기준값(x)을 위험지수(RI)로, x_{\max} 를 RI_{\max} 로 치환하고, u 의 최댓값은 1이나 충돌 위험도의 최댓값(P_{\max})을 100으로 하여 식(4.2)를 구하고 이를

그래프로 나타내면 Fig. 4.2와 같다.

$$CoRi(RI) = \frac{P_{\max}}{1 - \exp(-\rho)} [1 - \exp(-\rho \frac{RI}{RI_{\max}})] \quad (4.2)$$

$CoRi$: VTSO의 위험 태도에 따른 충돌 위험도

RI : 선박 충돌 위험지수(Risk Index)

P_{\max} : 충돌 위험도 최댓값(=100)

ρ = 위험 태도($\rho < 0$: 회피, $\rho = 0$: 중립, $\rho > 0$: 감수)

RI_{\max} : 충돌 위험지수 최댓값(=8)

여기서, RI 의 각 위험지수는 3장에서 설명하였으며 식(4.3)과 같다.

$$RI = E_{ij} \cdot T_{ij} \cdot A_{ij} \quad (4.3)$$

$E_{ij} = R_{cpa}(\theta_i) + R_{cpa}(\theta_j)$, 선박 조우상황에 따른 위험지수(최대 2.0)

$R_{cpa}(\theta_i)$: CPA에서의 i 선박 상대방위에 따른 위험값

$R_{cpa}(\theta_j)$: CPA에서의 j 선박 상대방위에 따른 위험값

$T_{ij} = R_{at}(t_i) + R_{at}(t_j)$, 선박 간 최단 접근시간에 따른 위험지수(최대 2.0)

$R_{at}(t_i)$: i 선박의 주요·세부요인이 고려된 접근시간 위험값

$R_{at}(t_j)$: j 선박의 주요·세부요인이 고려된 접근시간 위험값

$A_{ij} = R_{sd}(f_i) + R_{sd}(f_j)$, 선박 간 근접거리에 따른 위험지수(최대 2.0)

$R_{sd}(f_i)$: i 선박의 근접 위험값

$R_{sd}(f_j)$: j 선박의 근접 위험값

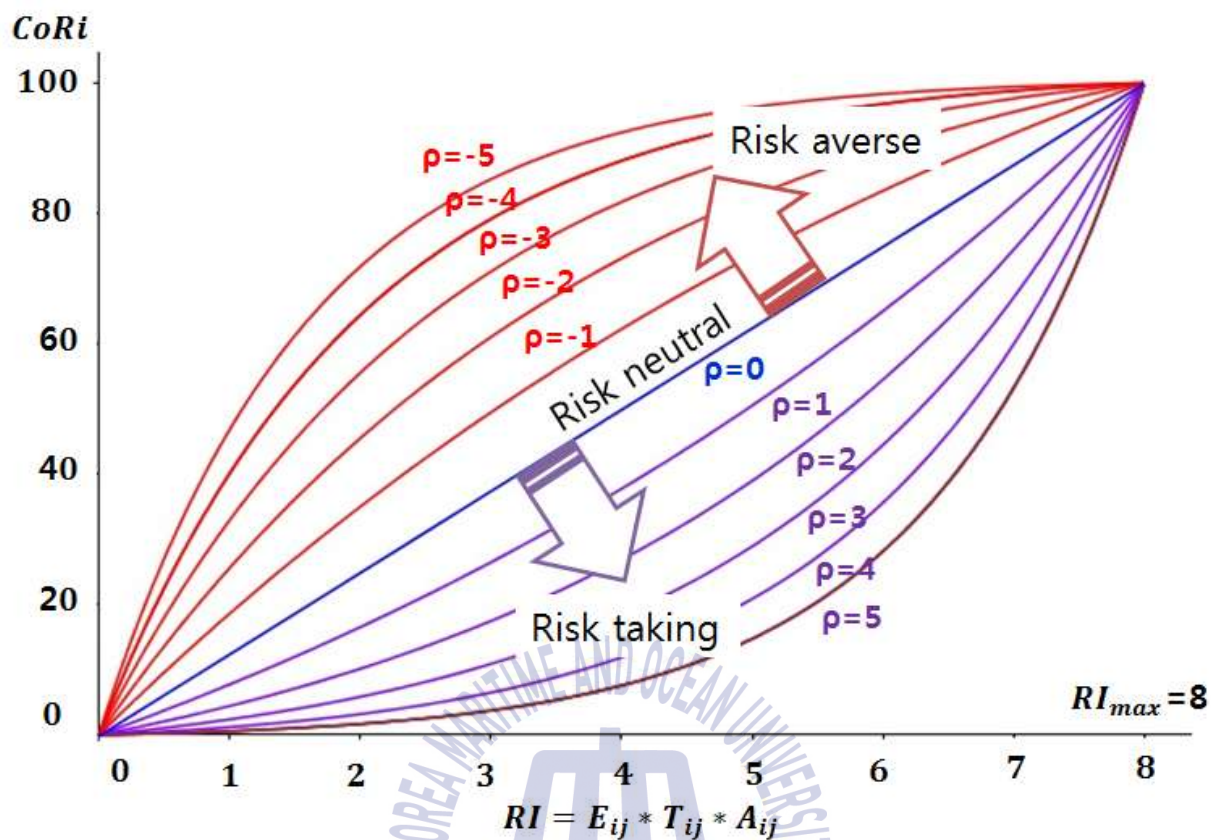


Fig. 4.2 Collision Risk associated with different VTSO' s risk attitudes

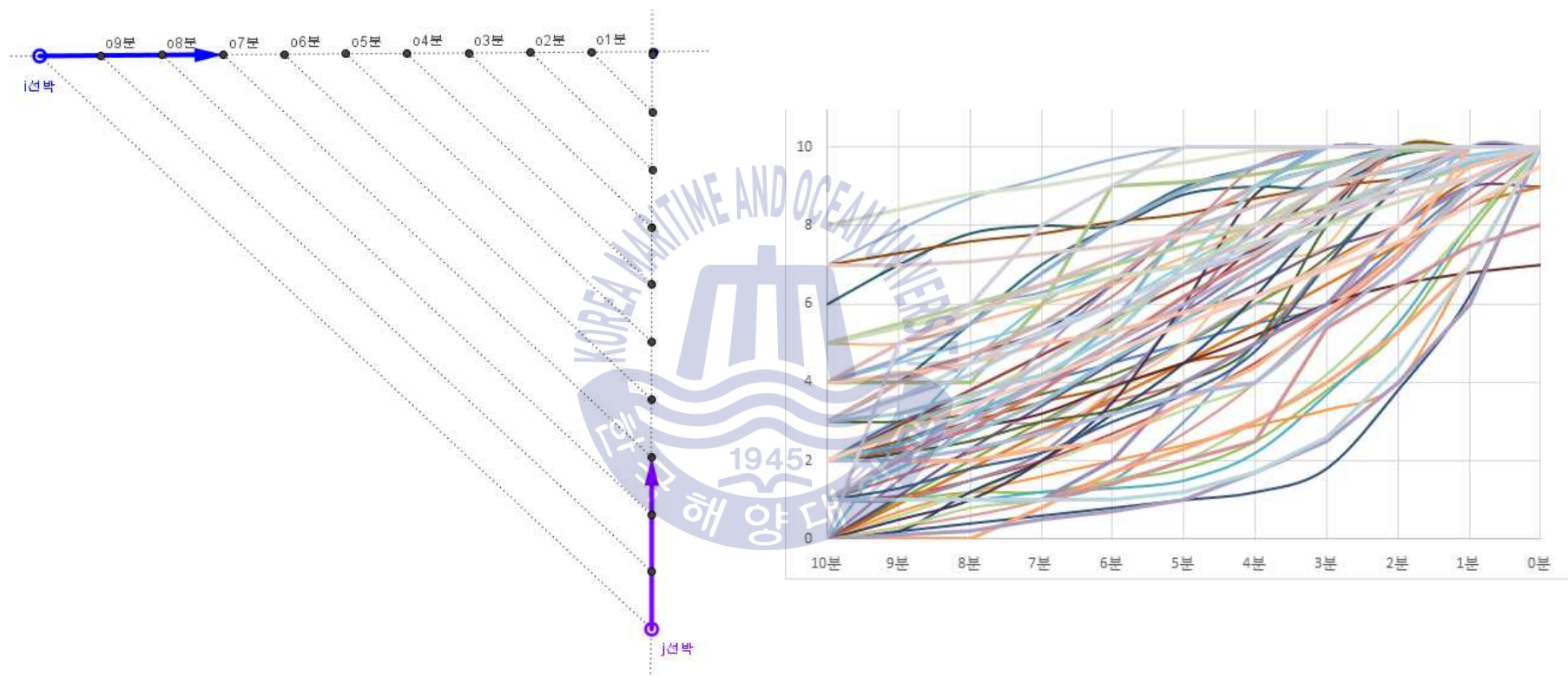
4.2 설문분석을 통한 VTSO 위험 태도 연구

VTSO 개인의 근무 경력과 근무지 등이 위험 태도에 영향이 있는지를 분석하기 위해 앞서 2016년 6월 20일부터 7월 15일에 실시한 설문조사에 응답한 VTSO 70명의 기초 자료를 연령대, VTS 경력, VTSO 근무 전 최종 승선 직책 그리고 현재 근무지별로 구분하면 Table 4.2과 같다.

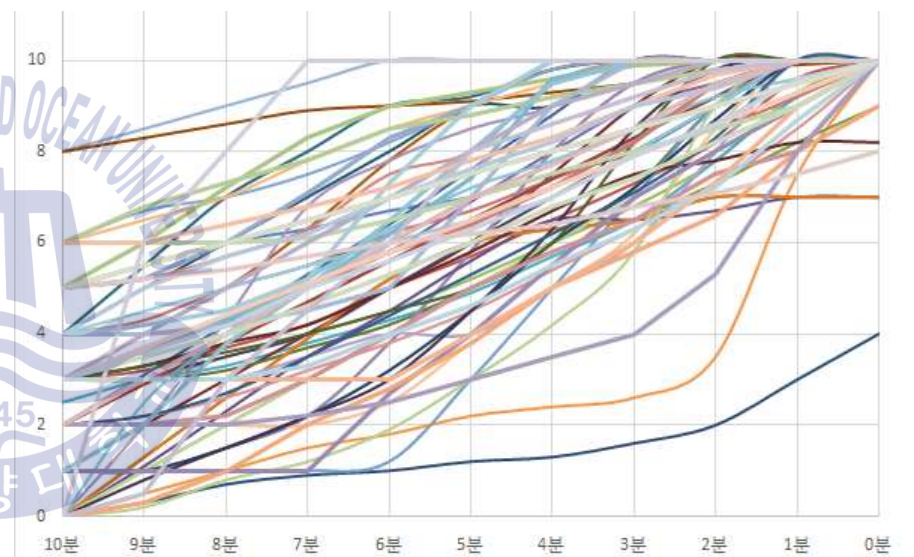
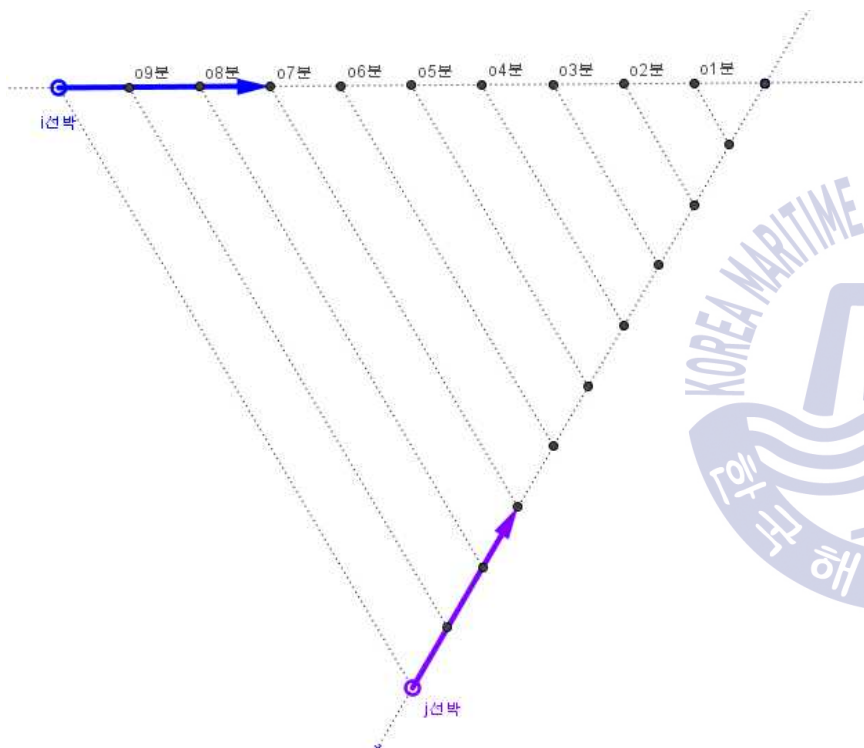
Fig. 4.3의 좌측(또는 상단) 그림은 설문조사에 제시된 각 선박 교차 상황 (Situation)으로 충돌 임박까지 남아있는 여유 시간에 따른 VTSO가 느끼는 위험 정도를 조사하였고, Fig. 4.3의 우측(또는 하단) 그래프는 이에 대한 VTSO 70명의 위험 정도를 개인별로 나타낸 것이다.

Table 4.2 Survey basic data of VTSO

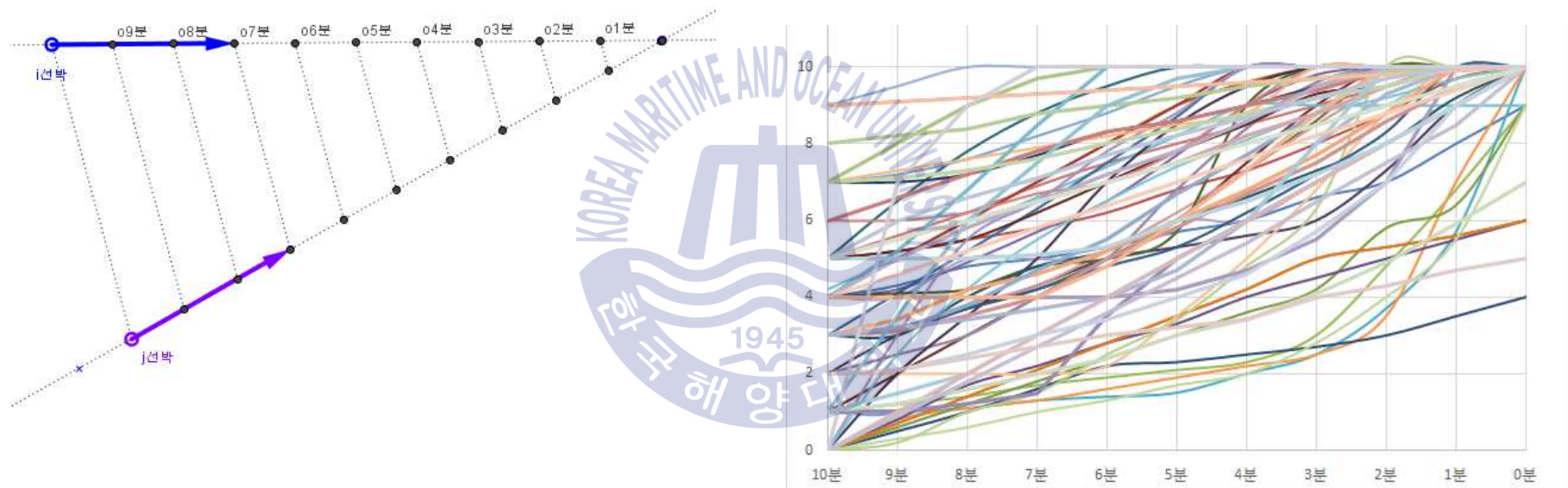
| 나이대 | 응답 | 퍼센트(%) | VTS 경력 | 응답 | 퍼센트(%) |
|--------|----|--------|--------|----|--------|
| 20대 | 4 | 5.7 | 5년 이하 | 34 | 48.6 |
| 30대 | 45 | 64.3 | 6~10년 | 19 | 27.1 |
| 40대 | 10 | 14.3 | 11년 이상 | 17 | 24.3 |
| 50대 이상 | 11 | 15.7 | | | |
| 최종 직책 | 응답 | 퍼센트(%) | 근무지 | 응답 | 퍼센트(%) |
| 선장 | 2 | 2.9 | B 센터 | 16 | 22.8 |
| 일항사 | 17 | 24.2 | N 센터 | 11 | 15.7 |
| 2항사 | 33 | 47.1 | P 센터 | 8 | 11.5 |
| 3항사 | 9 | 12.9 | U 센터 | 8 | 11.5 |
| 통신장 | 9 | 12.9 | K 센터 | 10 | 14.2 |
| | | | D 센터 | 8 | 11.5 |
| | | | 기타 | 9 | 12.8 |



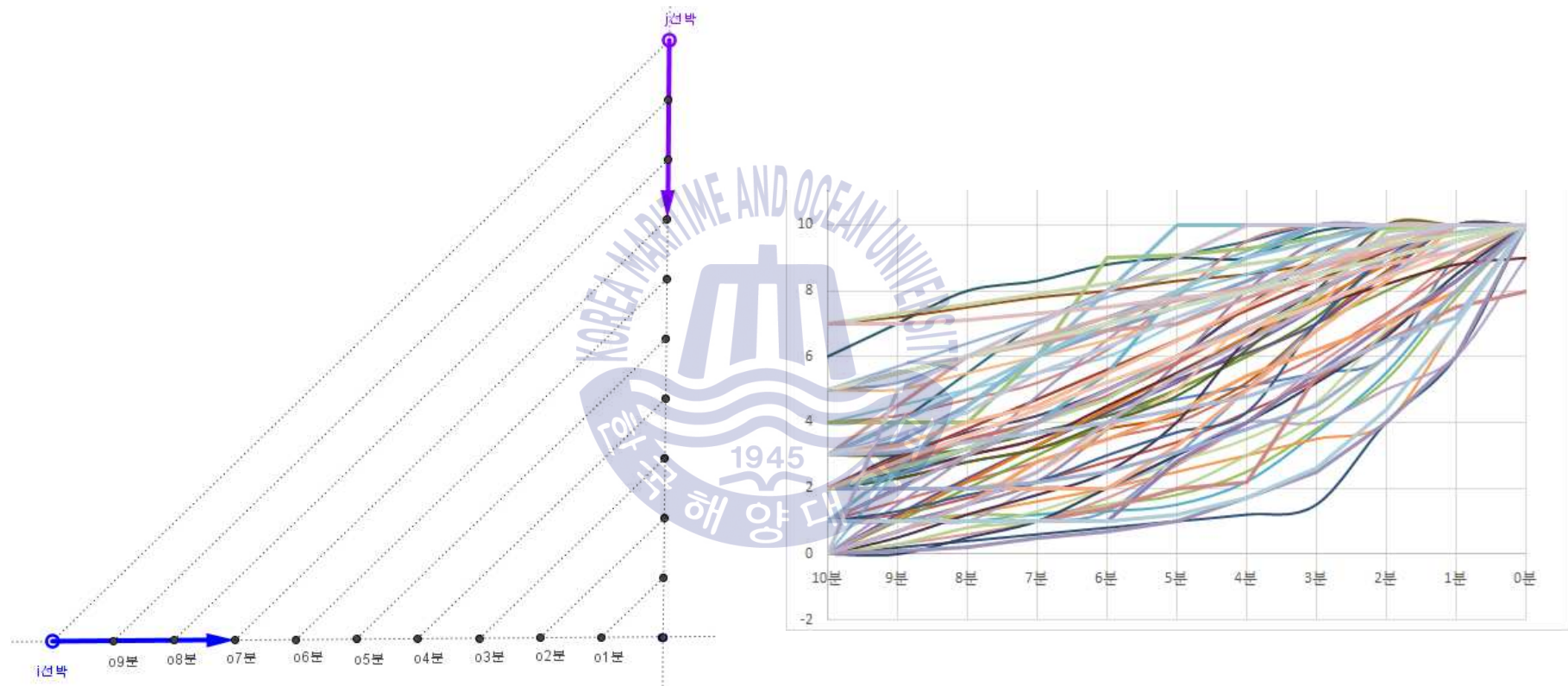
Situation 1



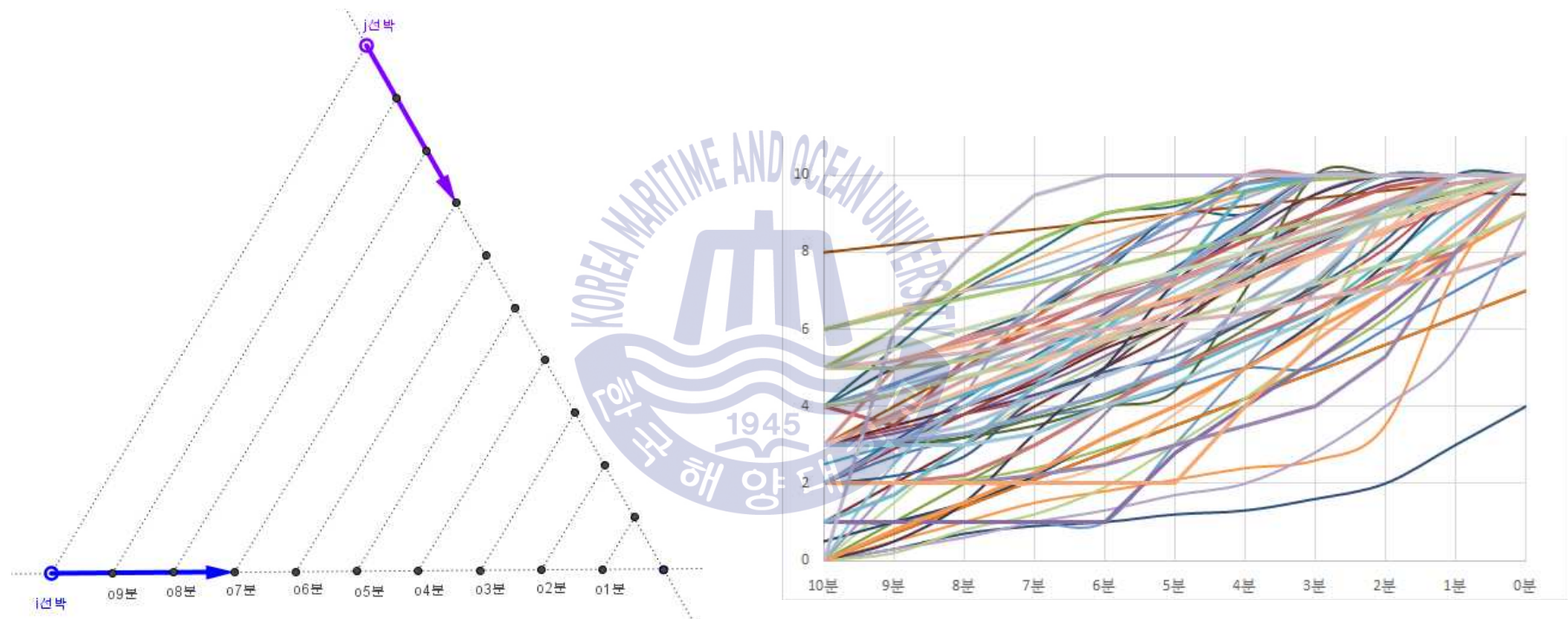
Situation 2



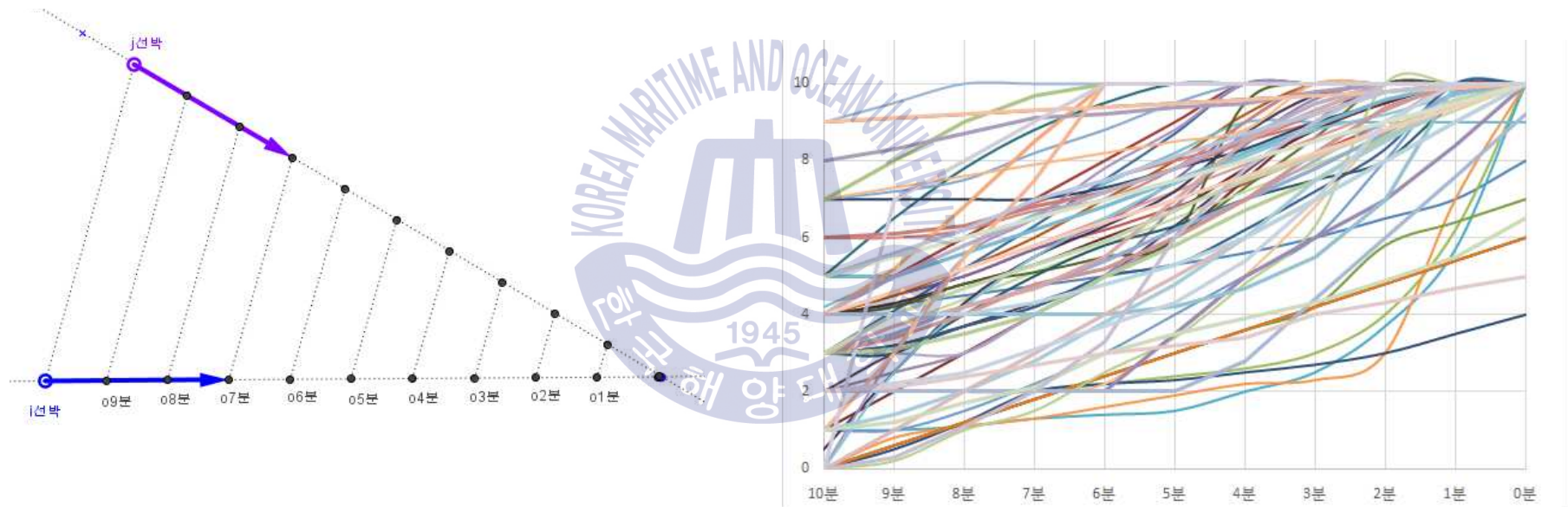
Situation 3



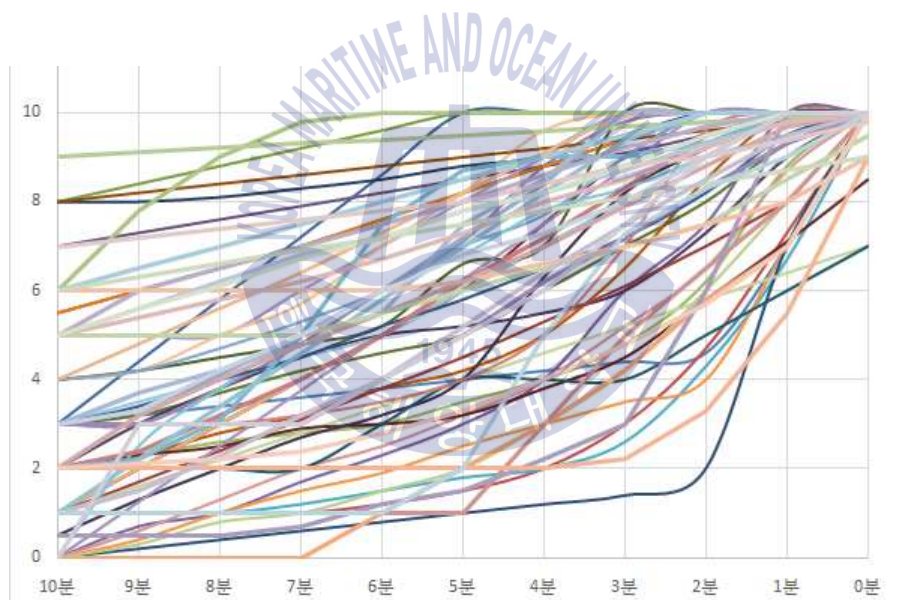
Situation 4



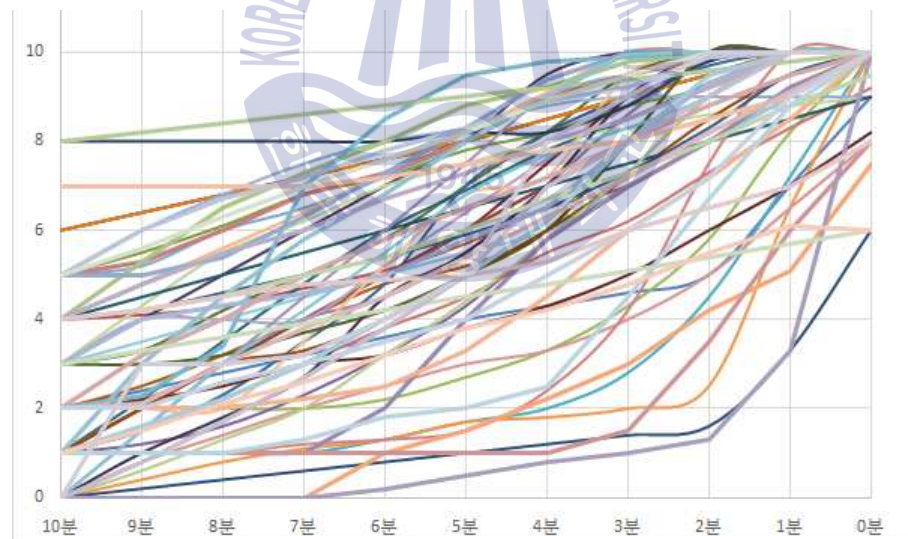
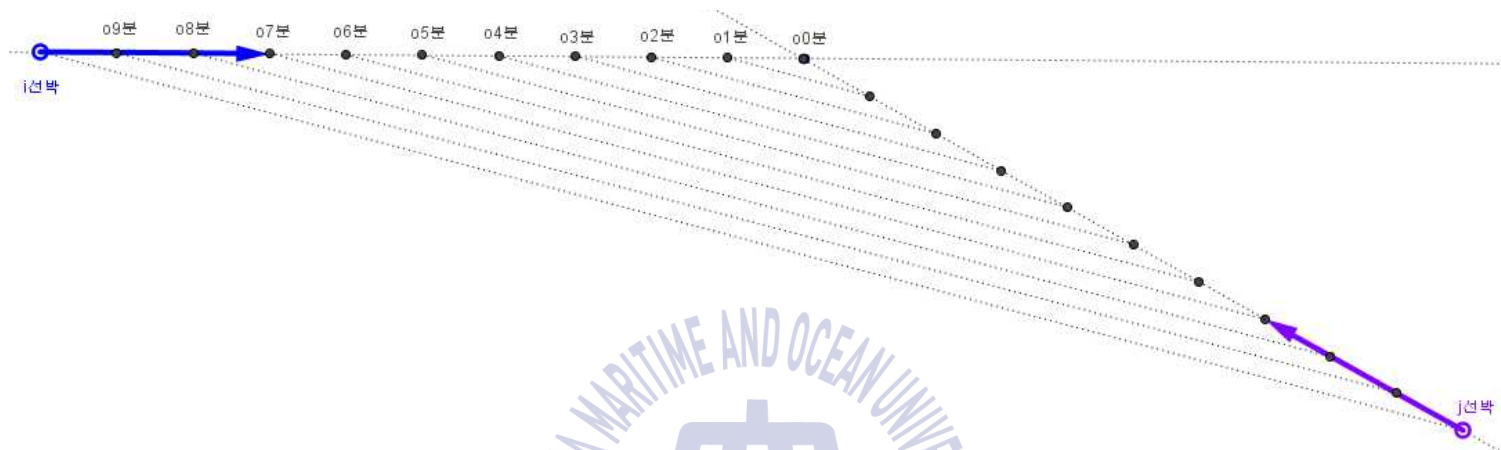
Situation 5



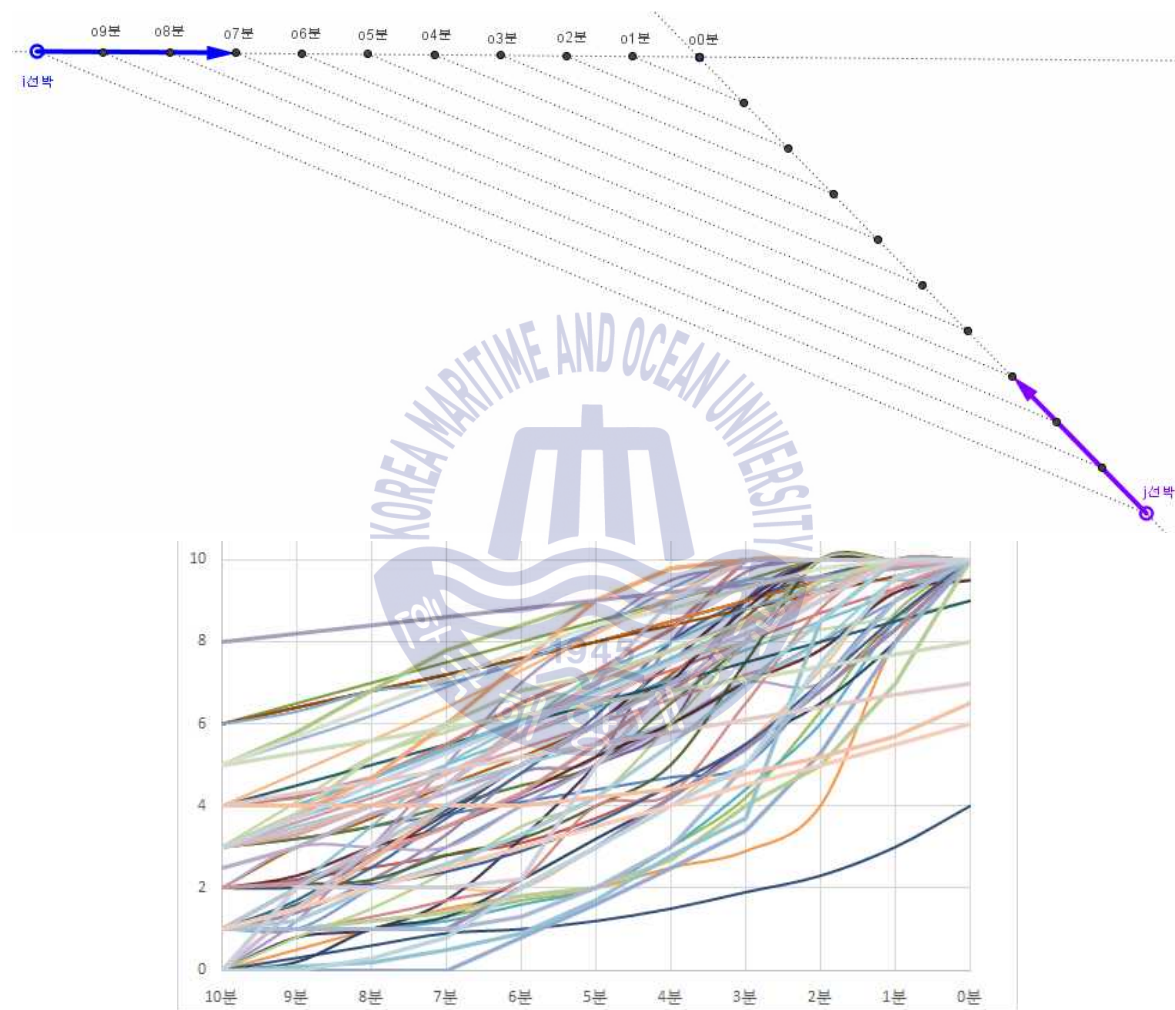
Situation 6



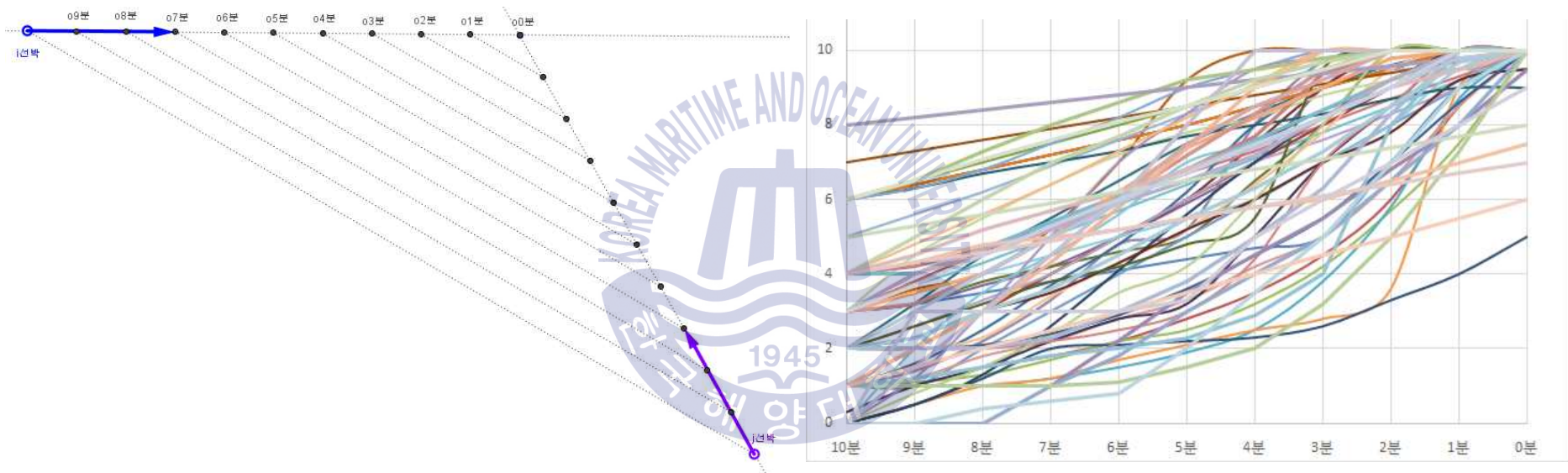
Situation 7



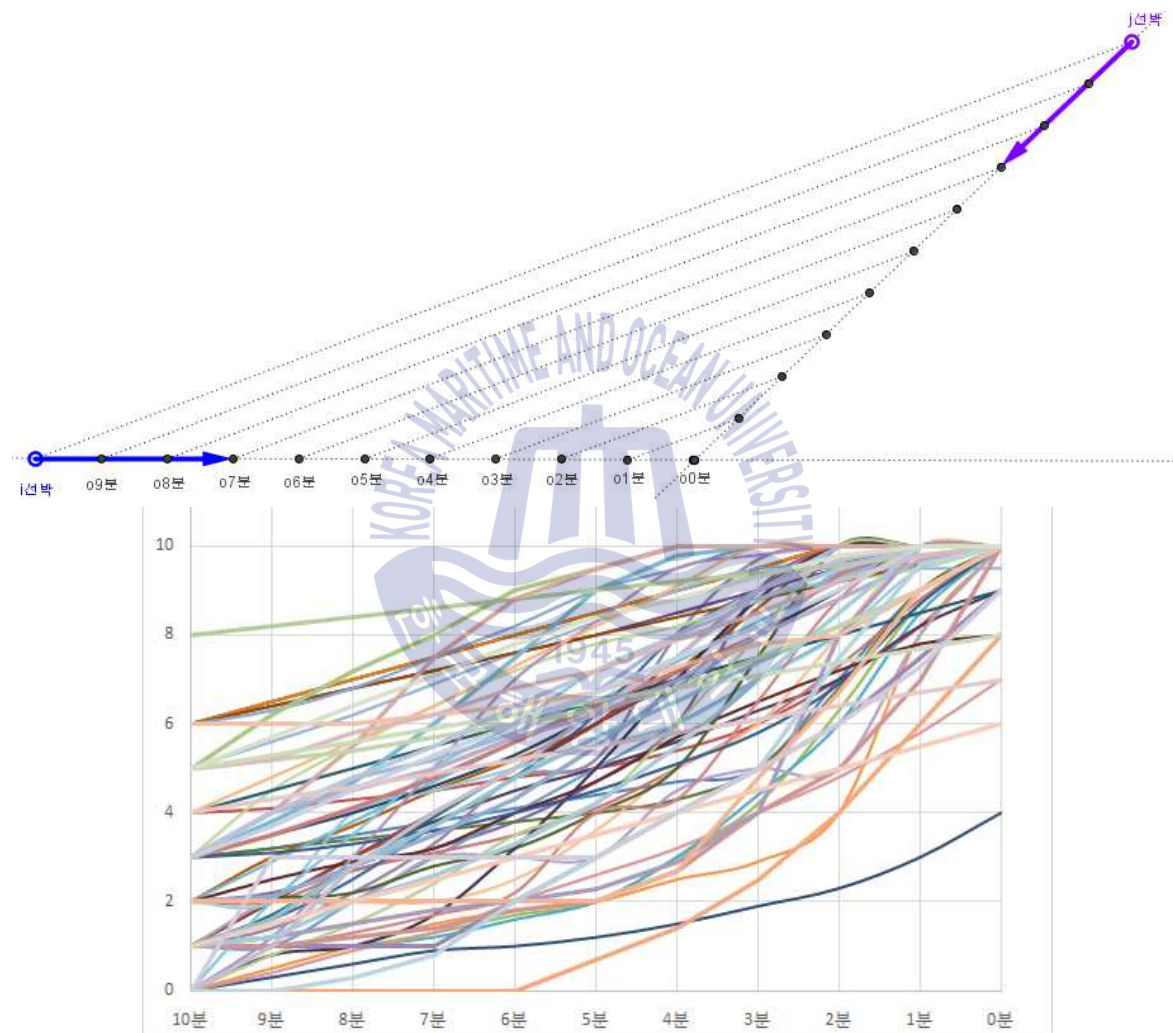
Situation 8



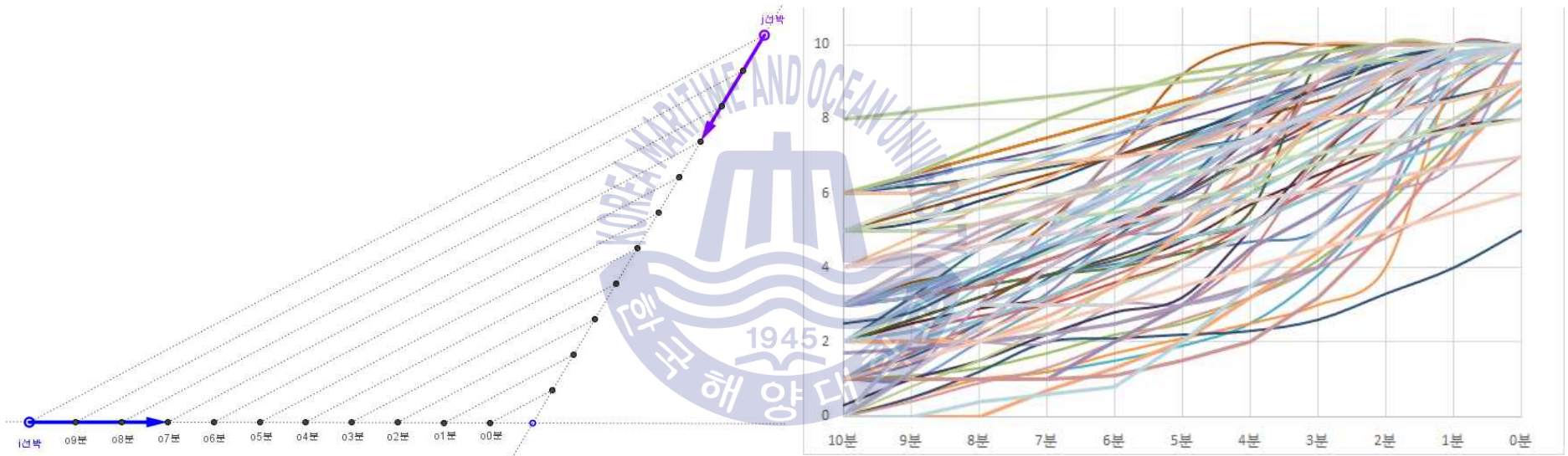
Situation 9



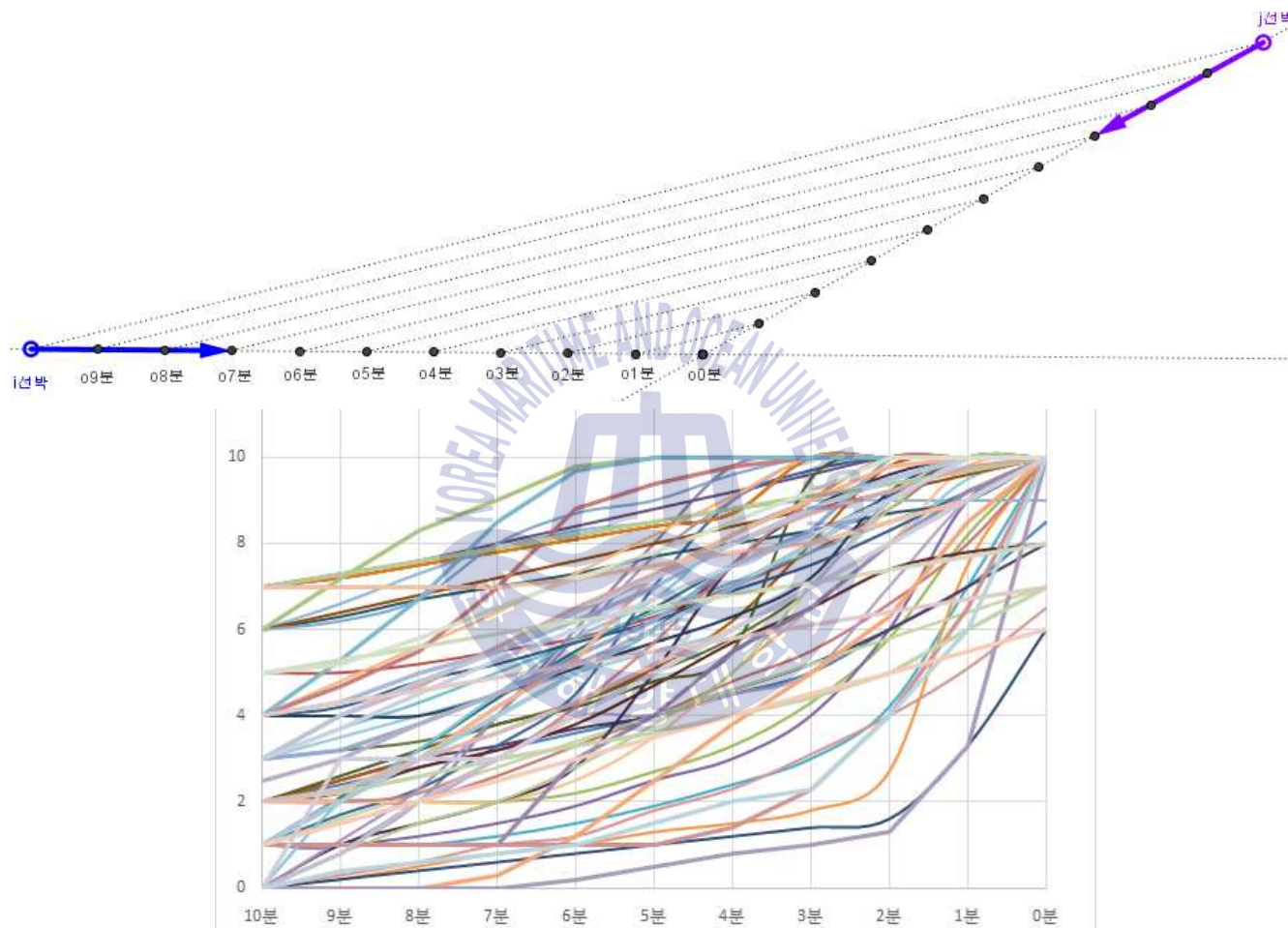
Situation 10



Situation 11



Situation 12



Situation 13

Fig. 4.3 The situation presented in the questionnaire(left or up) and Individual risk of VTSO(right or down)

설문에서 VTSO 개인별로 그래프를 비교한 결과, 어느 한 교차 상황에 대하여 위험 정도를 비교적 낮게 응답한 VTSO는 다른 교차 상황에 대해서도 전반적으로 낮게 응답하였다. 이는 위험 정도를 높게 응답하거나 중간 정도로 응답한 VTSO도 마찬가지였다.

결국, VTSO는 양 선박의 조우각에 따른 조우 상황보다 충돌 임박까지 남아 있는 여유 시간에 따라 느끼는 위험 정도가 더 큰 영향을 받는 것으로 보인다.

Fig. 4.2의 VTSO 위험 태도에 따른 충돌 위험도 그래프와 Fig. 4.3의 VTSO 개인별 위험 정도 그래프를 비교하여 위험 감수(Risk taking), 위험 중립(Risk neutral) 그리고 위험 회피(Risk averse)형으로 대략 구분이 가능하였고 대부분의 VTSO가 중립적인 성향을 보였다.

또한 설문에서 제시된 선박 교차 상황 중 Situation 1과 4, Situation 2과 5, Situation 3과 6, Situation 8과 13, Situation 9과 11, 그리고 Situation 10과 12는 조우각이 같은 상황으로 VTSO 개인별 위험 정도도 비슷한 결과를 보였다.

VTSO의 위험 태도를 좀 더 자세하게 구분하기 위하여 Fig. 4.2의 Situation 1, Situation 2 그리고 Situation 3에 대한 VTSO의 위험 정도를 경력별로 구분하여 그래프로 나타내면 Fig. 4.4, Fig. 4.5, Fig. 4.6과 같았다.

다음으로 같은 상황에 대하여 VTSO의 위험 정도를 센터별로 구분하여 그래프로 나타내면 Fig. 4.7, Fig. 4.8, Fig. 4.9와 같았다.

하지만 VTSO의 경력별, 센터별로 구분한 그래프의 형태만으론 위험 태도를 구분할 수 없어 다음 절에서 식(4.2)를 적용하여 $CoRi$ 를 구하고 이 값과 VTSO 개인별 위험 정도와 일치도(상관계수)를 비교하고자 한다.

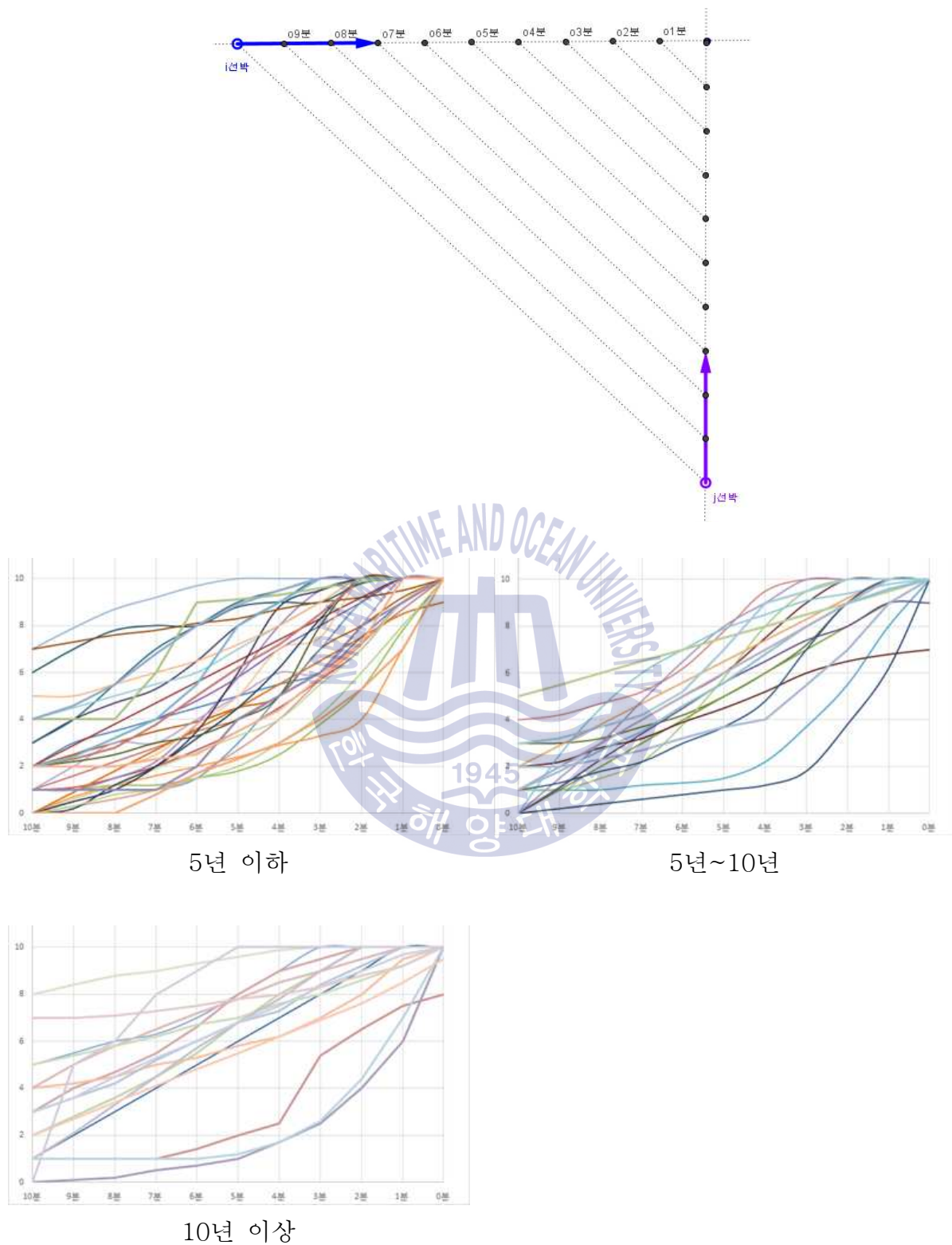


Fig. 4.4 Comparison of risk level by VTSO's experience (Situation 1)

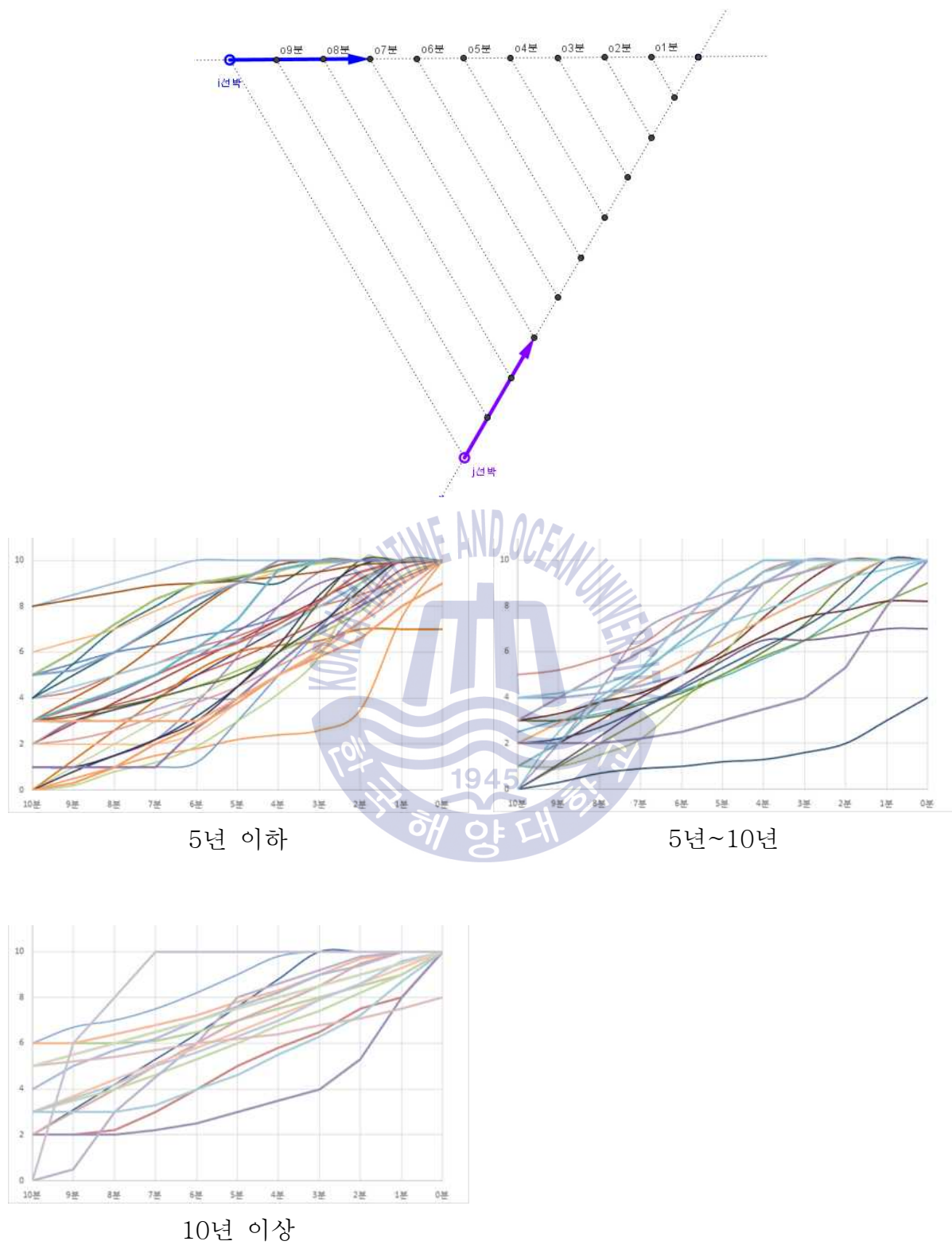


Fig. 4.5 Comparison of risk level by VTSO's experience (Situation 2)

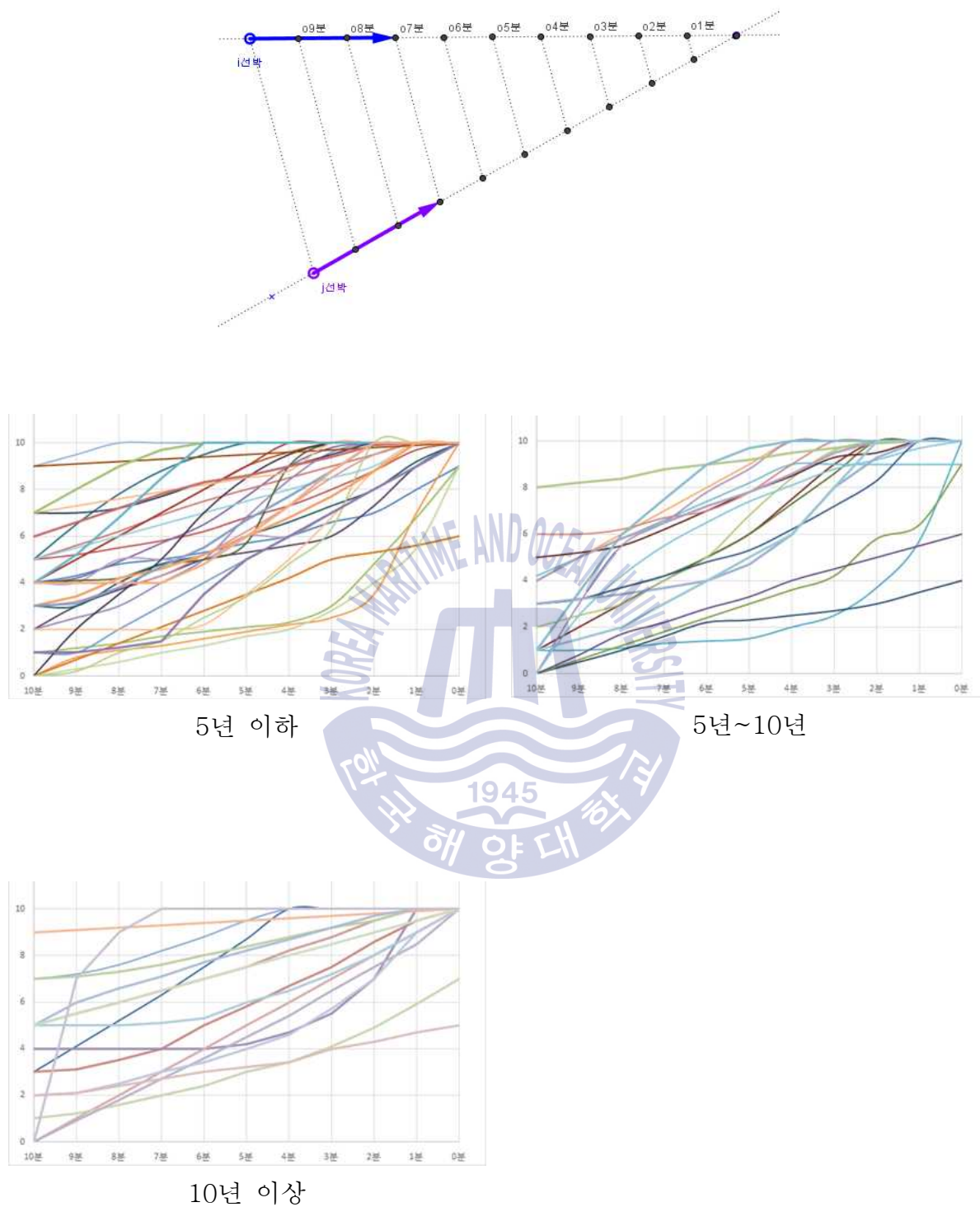
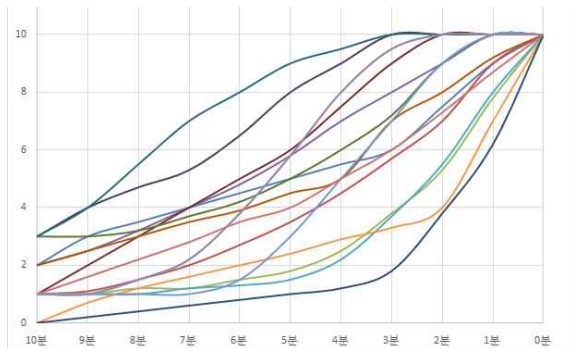
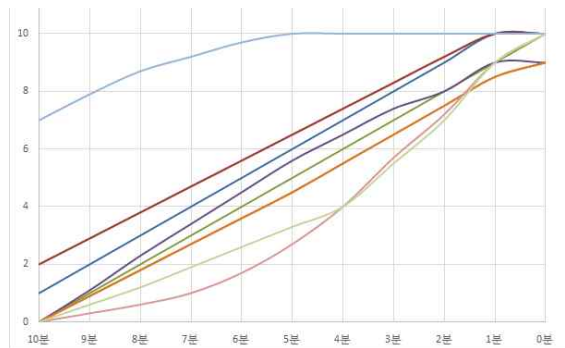


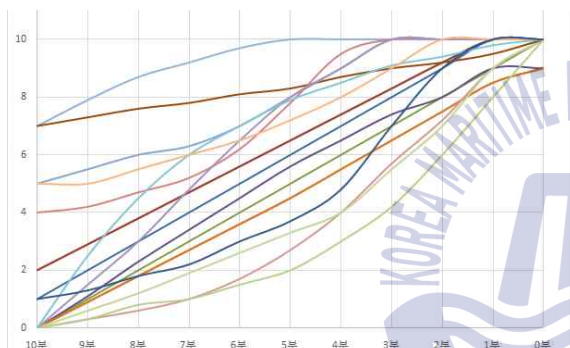
Fig. 4.6 Comparison of risk level by VTSO' s experience (Situation 3)



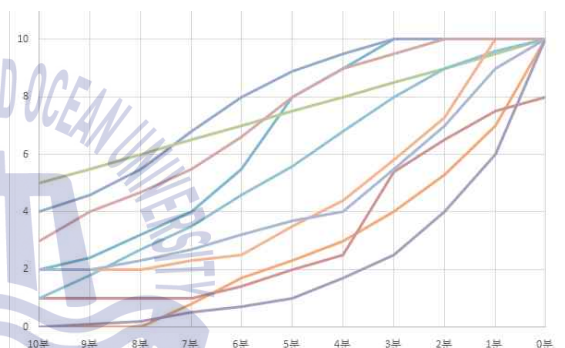
B center



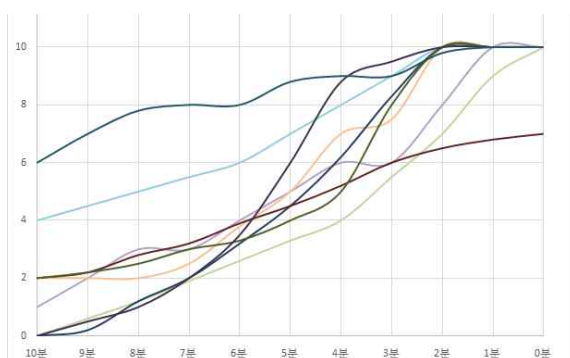
N center



U center

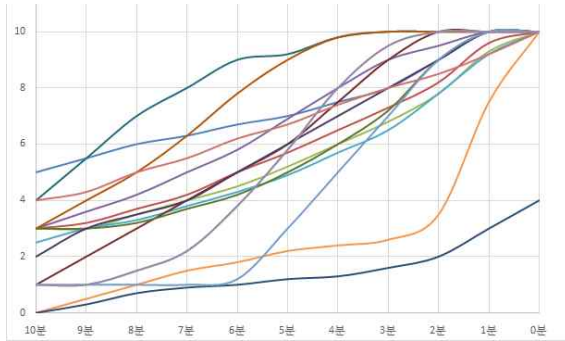


K center

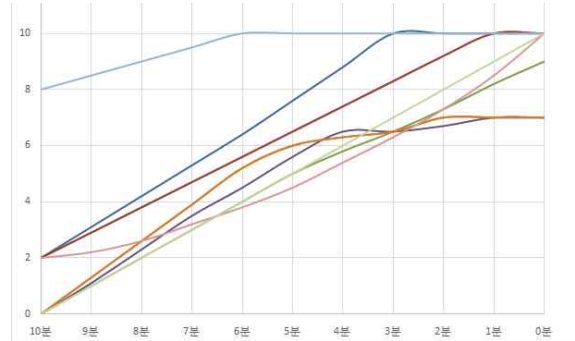


P center

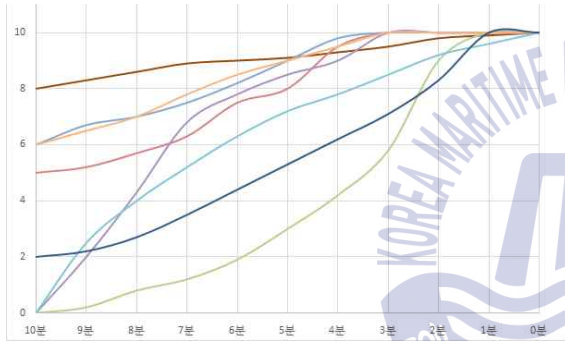
Fig. 4.7 Comparison of risk level by VTS center (Situation 1)



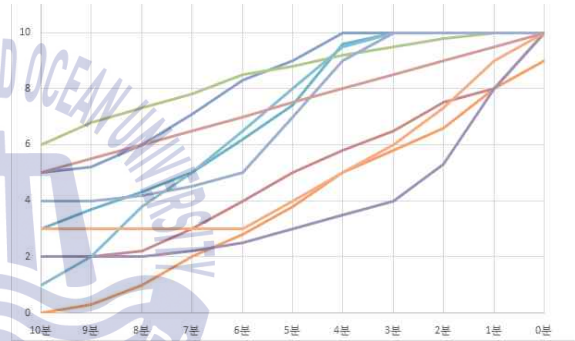
B 센터



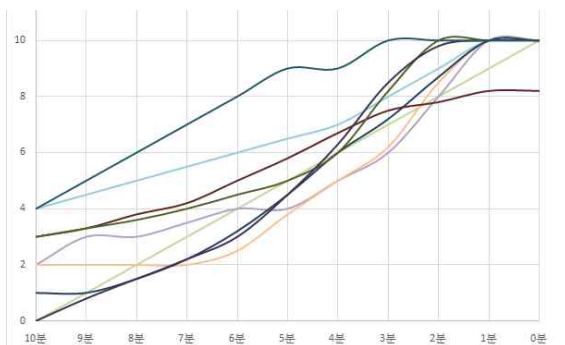
N 센터



U 센터

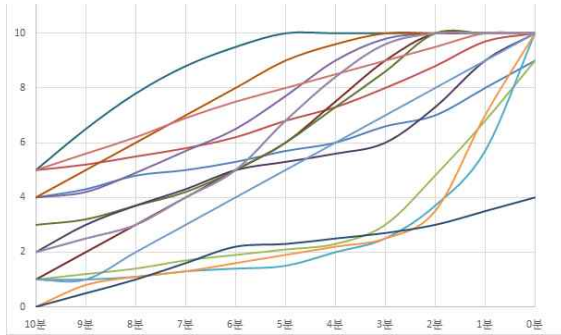


K 센터

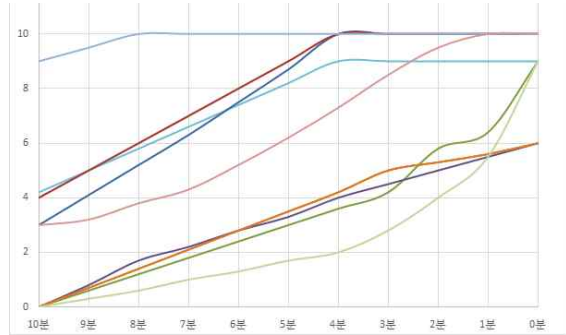


P 센터

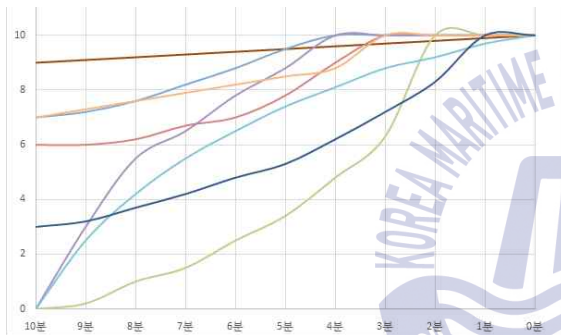
Fig. 4.8 Comparison of risk level by VTS center (Situation 2)



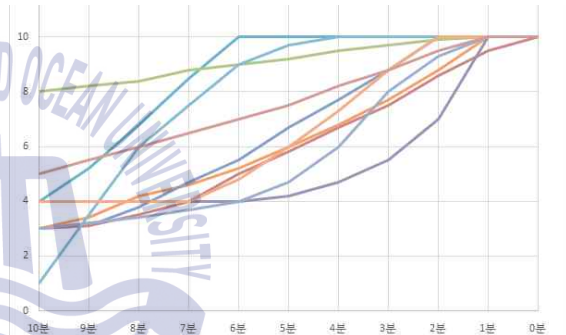
B 센터



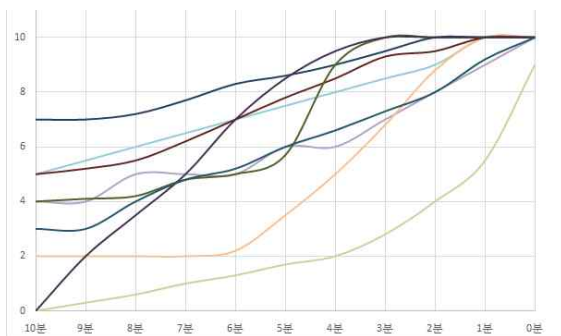
N 센터



U 센터



K 센터



P 센터

Fig. 4.9 Comparison of risk level by VTS center (Situation 3)

4.3 VTSO 개인별 위험 태도 분석

양 선박이 CPA가 0일 때 서로 마주치거나 교차하는 상황에 대하여 충돌 10분 전부터 식(4.2)를 적용하여 각 위험 태도(ρ)에 따라 $CoRi$ 를 각각 구하면 Table 4.3과 같고, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 4.10과 같다.

여기서, ρ 가 $\pm 5 \sim \pm 4$ 는 매우 강한, $\pm 3 \sim \pm 2$ 는 강한, ± 1 은 약간 위험 감수(또는 위험 회피)형을 나타낸다.

Fig. 4.3과 같이 설문에 제시된 각 선박 교차 상황(S1~S13)에 대하여 VTSO 개인이 응답한 위험 정도를 Table. 4.2와 일치도(상관계수, Corr.)가 높은 위험 태도(ρ)를 구하면 Table 4.4와 같다.

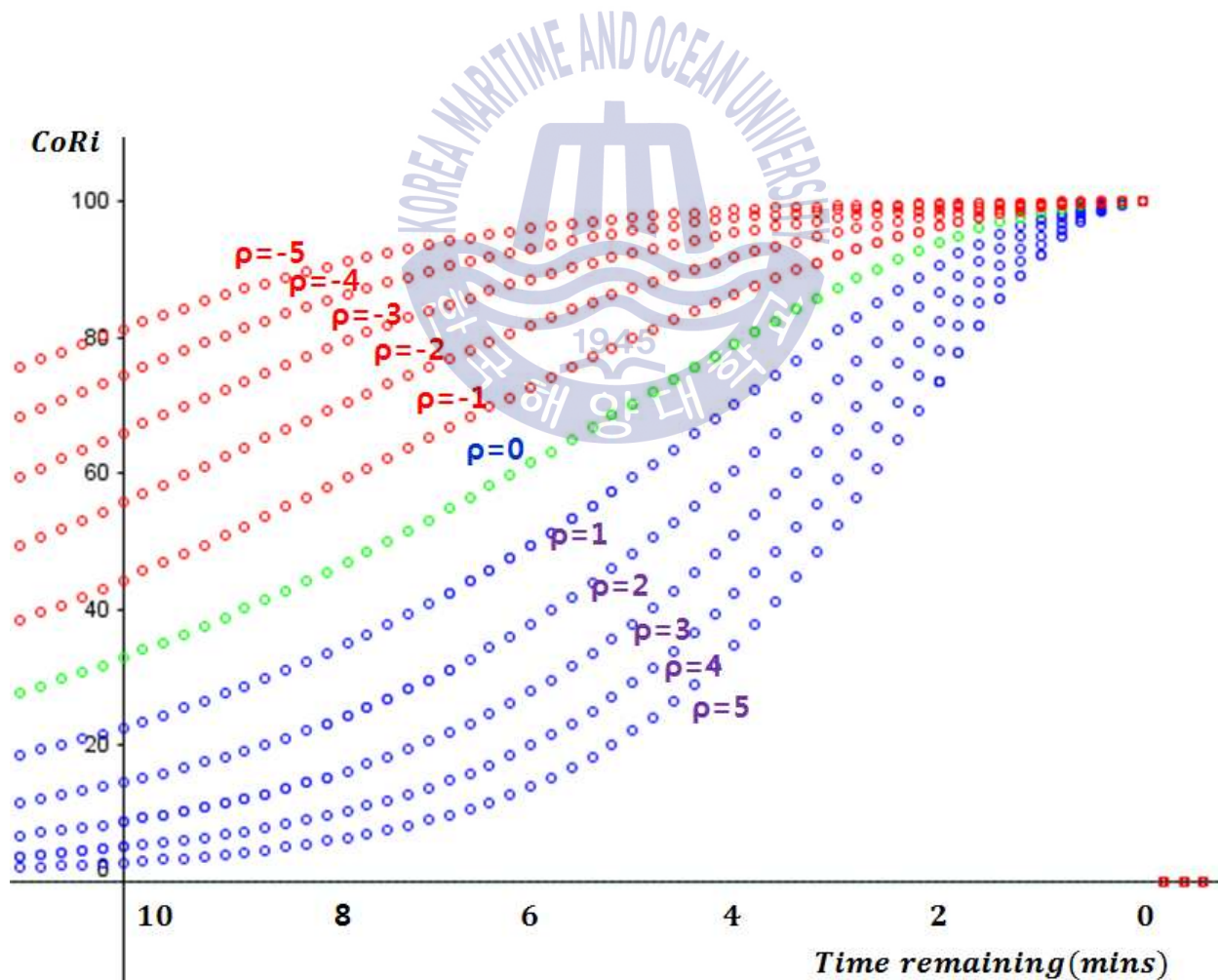


Fig. 4.10 $CoRi$ associated with risk attitudes from 10mins before collision

Table 4.3 Value of *CoRi* associated with risk attitudes

| ρ | 10분 | 9분 | 8분 | 7분 | 6분 | 5분 | 4분 | 3분 | 2분 | 1분 | 0분 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| -5 | 81.27 | 86.25 | 90.39 | 93.65 | 96.04 | 97.69 | 98.75 | 99.39 | 99.76 | 99.94 | 100 |
| -4 | 74.57 | 80.33 | 85.44 | 89.75 | 93.18 | 95.75 | 97.56 | 98.76 | 99.49 | 99.88 | 100 |
| -3 | 66.04 | 72.43 | 78.46 | 83.92 | 88.63 | 92.47 | 95.43 | 97.55 | 98.96 | 99.74 | 100 |
| -2 | 55.78 | 62.48 | 69.21 | 75.77 | 81.88 | 87.31 | 91.87 | 95.45 | 97.98 | 99.49 | 100 |
| -1 | 44.38 | 50.93 | 57.95 | 65.29 | 72.71 | 79.89 | 86.47 | 92.07 | 96.36 | 99.06 | 100 |
| 0 | 32.92 | 38.85 | 45.62 | 53.23 | 61.55 | 70.32 | 79.09 | 87.23 | 93.94 | 98.40 | 100 |
| 1 | 22.69 | 27.63 | 33.65 | 40.90 | 49.50 | 59.37 | 70.15 | 81.04 | 90.70 | 97.49 | 100 |
| 2 | 14.58 | 18.39 | 23.33 | 29.73 | 37.94 | 48.22 | 60.48 | 73.94 | 86.80 | 96.36 | 100 |
| 3 | 8.83 | 11.57 | 15.35 | 20.63 | 27.96 | 37.95 | 50.97 | 66.51 | 82.50 | 95.07 | 100 |
| 4 | 5.10 | 6.96 | 9.71 | 13.82 | 20.01 | 29.21 | 42.28 | 59.26 | 78.07 | 93.69 | 100 |
| 5 | 2.84 | 4.05 | 5.96 | 9.03 | 14.04 | 22.14 | 34.72 | 52.50 | 73.68 | 92.27 | 100 |

Table 4.4 The result of risk attitudes and corr. coefficient as compared with *CoRi* and each VTSO

| VTSO | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | Overall |
|------|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|---------|
| | Risk attitude(ρ) | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 4 | 3 | 4 | 5 | 2 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 |
| 2 | 4 | 2 | 3 | 5 | 3 | 1 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| 3 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 4 | 1 | 0 | -1 | 2 | 1 | 0 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 7 | 5 | 5 | -1 | 5 | 5 | -2 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 | 3 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 4 | 0 | 3 | 3 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 10 | -1 | 1 | 3 | 1 | 0 | 0 | 3 | -2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 |
| 11 | -4 | -5 | -5 | -5 | -5 | -5 | 0 | -1 | 0 | -2 | 0 | -2 | 0 | -3 |
| 12 | 4 | -3 | -3 | 4 | -3 | -1 | 4 | 2 | 1 | -2 | 1 | -2 | 1 | 0 |
| 13 | 4 | 4 | 1 | 4 | 4 | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 14 | 3 | 1 | -1 | 3 | 1 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 4 | 3 | 0 | 1 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| VTSO | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | Overall |
|------|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|---------|
| | Risk attitude(ρ) | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 0 | 0 | -3 | 0 | 0 | -3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | -3 | 0 | 0 | -3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | -2 | -3 | 0 | -2 | -3 | -5 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 |
| 20 | 0 | 0 | -3 | 0 | 0 | -3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 1 | 0 | 4 | 1 | 0 | 2 | -5 | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 |
| 22 | -1 | -3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 23 | 1 | -4 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0 |
| 24 | 1 | -4 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0 |
| 25 | -5 | -5 | -5 | -2 | -2 | -5 | -2 | -4 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -3 |
| 26 | 4 | 3 | 1 | 4 | 0 | 0 | 4 | 4 | 2 | 5 | 3 | 3 | 2 | 3 |
| 27 | 4 | 1 | 5 | 5 | -1 | 1 | 1 | -3 | -2 | -2 | -2 | 1 | -2 | 0 |
| 28 | 2 | 5 | 4 | 4 | 5 | 2 | 0 | 1 | 3 | 0 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 29 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 30 | 1 | 5 | 4 | 2 | 5 | 4 | 0 | 0 | 5 | 2 | 5 | 1 | 5 | 3 |
| 31 | 1 | 2 | 0 | 4 | 3 | 3 | 2 | 5 | 3 | 0 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| 32 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 5 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 33 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 4 | 2 | 4 | 2 |
| 34 | 0 | 1 | -3 | 2 | -1 | -2 | 2 | 0 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 |

| VTSO | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | Overall |
|------|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|---------|
| | Risk attitude(ρ) | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | -2 | -3 | 2 | -3 | -2 | 1 | 4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 |
| 36 | 1 | -1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 37 | 0 | -2 | -2 | -1 | -2 | -2 | 1 | -1 | 0 | -2 | -2 | 0 | 0 | -1 |
| 38 | 0 | -1 | 1 | 0 | -1 | 1 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 2 |
| 39 | 5 | 4 | 3 | 5 | 4 | 3 | 5 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 40 | -3 | -5 | -5 | -3 | -5 | -5 | -1 | -2 | -3 | -3 | -3 | -3 | -3 | -3 |
| 41 | -4 | -3 | -3 | -4 | -3 | -3 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -3 |
| 42 | 1 | -2 | 1 | 1 | -2 | 1 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -1 |
| 43 | 3 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 4 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 3 |
| 44 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| 45 | -2 | -5 | -5 | -2 | -5 | -5 | -5 | -3 | -3 | -3 | -4 | -2 | -3 | -4 |
| 46 | 3 | 3 | 2 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 |
| 47 | -1 | -1 | -5 | -1 | -1 | 1 | -2 | -4 | 1 | 1 | -3 | 0 | 1 | -1 |
| 48 | 5 | 1 | 2 | 1 | 1 | -5 | 5 | 5 | -3 | 0 | 5 | 4 | -3 | 1 |
| 49 | -3 | -2 | 1 | -1 | -2 | 1 | 0 | -1 | 5 | 4 | 1 | 0 | 5 | 1 |
| 50 | 5 | 2 | 2 | 5 | 2 | 2 | 5 | 5 | 1 | 0 | 5 | 5 | 1 | 3 |
| 51 | 1 | -2 | -1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 5 | 5 | 1 | 1 | 5 | 2 |
| 52 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | -2 | 5 | 5 | 1 | 0 | 5 | 5 | 1 | 3 |

| VTSO | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | Overall |
|------|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|---------|
| | Risk attitude(ρ) | | | | | | | | | | | | | |
| 53 | 0 | -2 | -5 | -4 | -2 | 5 | -1 | -3 | 5 | 5 | 0 | 1 | 5 | 0 |
| 54 | 5 | 5 | 2 | 5 | 5 | -5 | 5 | 5 | 0 | -1 | 5 | 2 | 0 | 3 |
| 55 | 5 | 1 | 3 | 5 | 3 | 5 | 0 | 3 | 5 | 5 | 0 | 1 | 5 | 3 |
| 56 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -5 | -1 | 0 | -1 |
| 57 | 0 | 4 | 1 | 1 | 2 | 0 | 5 | 2 | -1 | -2 | 4 | 5 | -1 | 2 |
| 58 | 0 | -2 | -1 | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 0 |
| 59 | 0 | -2 | 1 | -2 | 5 | 2 | -1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 |
| 60 | 5 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 5 | 5 | 5 | 2 | 5 | 1 | 5 | 3 |
| 61 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| 62 | -1 | -1 | 1 | 0 | -1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 63 | 2 | 2 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 64 | -1 | -2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | -2 | -2 | -1 | -1 | -2 | -1 |
| 65 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 |
| 66 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 67 | 0 | 1 | 5 | 0 | 3 | 3 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 68 | 5 | 2 | 2 | 5 | 2 | 2 | 2 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 69 | -3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 0 |
| 70 | -5 | -5 | -5 | -5 | -5 | -5 | 2 | 0 | 1 | 3 | 5 | 3 | 1 | -1 |

Table 4.5는 VTSO의 위험 태도에 따라 VTS 센터별, VTS 근무 경력별, 그리고 VTS 근무 전 선박에서 최종 직책별로 구분한 것이다.

설문에 응답한 70명의 VTSO 중에서 위험 중립형은 전체의 27.1%, 강한 위험 감수형은 17.1%, 약간 위험 감수형은 15.7% 순으로 대부분의 VTSO가 위험 감수형임을 알 수 있었다.

Table 4.5 Risk attitude analysis results of VTSO

| Risk attitude ρ | | Total | -4 | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------|-------|-------|-----|-----|----|----|------|------|------|------|-----|-----|
| VTSO | No. | 70 | 1 | 4 | - | 7 | 19 | 11 | 9 | 12 | 3 | 4 |
| | % | 100 | 1.4 | 5.7 | - | 10 | 27.1 | 15.7 | 12.9 | 17.1 | 4.3 | 5.7 |
| VTS center | B | 16 | - | 1 | - | - | 4 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| | N | 11 | - | 1 | - | 1 | 8 | - | - | 1 | - | - |
| | P | 8 | - | - | - | - | 1 | 1 | 4 | 2 | - | - |
| | U | 8 | - | 2 | - | 2 | - | 1 | 1 | 2 | - | - |
| | K | 10 | - | - | - | 2 | 1 | 2 | 1 | 4 | - | - |
| | D | 8 | - | - | - | 2 | 1 | 3 | 1 | - | - | 1 |
| | etc | 9 | 1 | - | - | - | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | - |
| VTS carrier | ≤5 | 34 | 1 | 2 | - | 2 | 8 | 7 | 4 | 5 | 3 | 2 |
| | 5~10 | 19 | - | 2 | - | - | 8 | 1 | 3 | 4 | - | 1 |
| | 10~15 | 4 | - | - | - | 2 | - | - | - | 2 | - | - |
| | 15~20 | 6 | - | - | - | 1 | - | 3 | 1 | 1 | - | - |
| | 20< | 7 | - | - | - | 2 | 3 | - | 1 | - | - | 1 |
| Final position | Capt. | 2 | - | - | - | - | - | 1 | - | 1 | - | - |
| | C/O | 17 | - | 3 | - | 3 | 6 | 2 | - | 2 | - | 1 |
| | 2/O | 33 | 1 | - | - | 3 | 7 | 5 | 7 | 5 | 3 | 2 |
| | 3/O | 9 | - | 1 | - | - | 4 | 1 | - | 3 | - | - |
| | R/O | 9 | - | - | - | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | - | 1 |

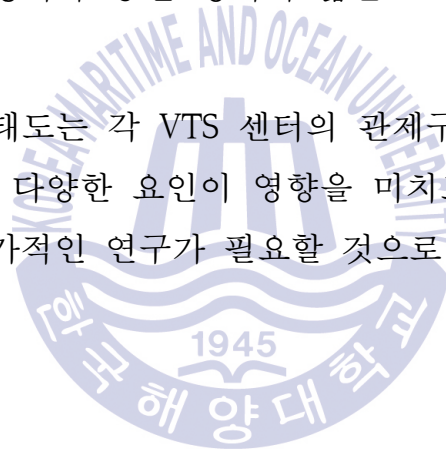
VTs 센터별로 VTsO의 위험 태도를 살펴보면 B 센터는 68.7%가 위험 감수형, N 센터는 72.7%가 위험 중립형, P 센터는 87.5%가 위험 감수형, K 센터는 70%가 위험 감수형, D 센터는 50%가 위험 감수형으로 N 센터를 제외하고 대부분의 VTs 센터에 근무하는 VTsO가 위험 감수형으로 나타났다.

이는 N 센터 항만으로 초대형 선박이 주로 입출항하여 타 VTs 센터에 근무하는 VTsO보다 충돌 위험을 좀 더 높게 인식하여 관제하는 것으로 분석된다.

VTs 경력별로는 5년 이하의 61.7%가 위험 감수형으로 VTsO 전체의 30%(21명)가 이에 해당하며, VTs 근무 전 최종 승선 직책으로 2등 항해사 경력자의 66.6%가 위험 감수형으로 전체의 31.4%(22명)가 이에 해당한다.

이를 통해 VTs 근무 경력과 승선 경력이 짧은 VTsO의 상당수가 위험 감수형임을 알 수 있다.

이처럼 VTsO의 위험 태도는 각 VTs 센터의 관제구역을 통항하는 선박의 선종, 교통량, 근무환경 등 다양한 요인이 영향을 미치므로 각 항만의 특성과 근무 경력 등을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.



제 5 장 선박 충돌 위험도 평가모델 검증

앞 장에서 선박 충돌 위험지수(RI)를 선박 조우 상황에 따른 위험(E_{ij}), 선박 간 근접거리에 따른 위험(A_{ij}), 그리고 선박 간 최단 접근시간에 따른 위험(T_{ij})으로 나누어 도출하고, VTSO의 위험 태도에 따른 충돌 위험도($CoRi$)를 제안하고 VTSO 개인별 위험 태도를 분석하였다.

이 장에서는 우리나라에서 선박 교통량이 가장 많고 충돌사고가 가장 자주 발생한 부산항 관제구역 내의 사고 및 준사고 사례의 AIS 항적 자료를 이용하여 본 논문에서 개발한 $CoRi$ 와 ES 모델(Inoue, 1998)의 교통 환경 스트레스치(ES_s)를 비교·분석하여 평가모델의 효용성을 검증하고자 한다.

ES 모델은 국내 해상교통 환경 영향 평가에 가장 많이 사용된 모델로서 본선을 둘러싸고 있는 주변 환경이 선박 운항자에게 가해지는 부하의 정도를 평가하기 위해 개발된 모델이다.

특히 ES_s 는 본선 주변의 타선박에 기인하여 선박 운항자가 느끼는 스트레스치로서 제삼자의 관점에서 선박의 충돌 위험을 예측하는 VTSO의 위험도와 얼마나 차이가 있고 장·단점은 무엇인지 비교할 수 있다.

그에 반해 PAWSA는 정성적인 모델이라 비교가 쉽지 않고, IWRAP은 정량적인 모델이긴 하나 일정 기간의 선박 교통량 수집이 선행되어야 하므로 실시간으로 변화하는 선박 움직임에 따른 충돌 위험도를 구하기 어려운 점이 있었다. 또한, PARK 모델은 고려해야 할 선박의 조건이 많아 이를 다 적용하기 어려웠다.

5.1 교통 환경 스트레스치를 이용한 위험도 추정

Inoue는 타선이 자선에 접근하는 상황에서 항해사가 느끼는 위험의 정도를 환경 스트레스로 정의하고, 표준적인 선장의 의식을 반영시키기 위한 변환식은 식(5.1)과 같다(Inoue, 1998; Son et al., 2009).

$$SJS = \alpha \left(\frac{R}{L_m} \right) + \beta \quad (5.1)$$

여기서, $\alpha = 0.00192 \times L_m$,

타선과의 마주침 조건이

우현에서 횡단하는 경우 : $\beta = -0.65 \cdot \ln(L_m) - 2.07$

좌현에서 횡단하는 경우 : $\beta = -0.65 \cdot \ln(L_m) - 2.35$

선수에서 마주치는 경우 : $\beta = -0.65 \cdot \ln(L_m) - 2.07$

선미에서 추월되는 경우 : $\beta = -0.65 \cdot \ln(L_m) - 0.85$

R : 자선과 타선의 상대거리, L_m : 자선과 타선의 평균길이

침로각별($\Delta\psi$)을 1° 씩 해서, 구해진 각 침로별로 $-3 \sim +3$ 의 위험감을 $+3$ 을 0 , -3 을 6 으로 하는 $0 \sim 6$ 으로 척도 변환하고, $\pm 90^\circ$ 의 범위에서 총계하고 그 순간의 교통 환경 스트레스치(ES_s)라 하며, 원침로를 중심으로 좌우 90° 의 범위의 어디를 향하더라도 위험 현재화까지의 여유 시간이 충분한 경우, 위험감 최소의 치가 180° 의 범위에 걸쳐 퍼져 있는 상태에 상당하기 때문에 $0 \times 180 = 0$ 을 최소, 좌우 90° 의 범위의 어디를 향하더라도 바로 위험이 현재화하는 경우에는, 위험감 최대의 값 6 이 180° 의 범위에 걸쳐 퍼져 있는 상태에 상당하기 때문에 $6 \times 180 \div 1000$ 을 최대로서 할당한다(Park et al., 2010; 남해지방해양경비안전본부, 2014).

$CoRi$ 는 선박 충돌 위험지수(RD)에 대한 VTSO의 위험 태도(ρ)가 충돌 위험도에 미치는 영향을 나타낸 것으로 식(5.2)와 같다.

$$CoRi(RI) = \frac{P_{\max}}{1 - \exp(-\rho)} [1 - \exp(-\rho \frac{RI}{RI_{\max}})] \quad (5.2)$$

$CoRi$: VTSO의 위험 태도에 따른 충돌 위험도

RI : 선박 충돌 위험지수(Risk Index)

P_{\max} : 충돌 위험도 최댓값(=100)

ρ = 위험 태도($\rho < 0$: 회피, $\rho = 0$: 중립, $\rho > 0$: 감수)

RI_{\max} : 충돌 위험지수 최댓값(=8)

ES_S 의 최댓값은 1000이고 $CoRi$ 의 최댓값은 100이다. 이를 비교하기 위하여 식(5.2)의 P_{\max} 를 1000으로 척도 변환하고, SJS 값이 3 이상이면 ES_S 의 최솟값인 0으로, SJS 값이 -3 이하인 경우 ES_S 의 최댓값인 1000으로 조정하여 비교하였다. 타선박이 우현에서 횡단하는 경우를 계산하면, 자선과 타선 길이의 평균에서 기준화한 타선과의 상대 거리(R/L_m)가 약 9.9가 될 때 최댓값 -3.01이 되고, R/L_m 가 약 38.5가 될 때 최솟값 +3.04가 된다.

5.2 충돌 사고 사례 적용

$CoRi$ 와 ES_S 를 적용한 충돌사고는 상호 시계 내에서 양 선박이 서로의 진로를 횡단하는 상태로 접근하던 중 피항선인 H 호가 매우 근접한 상태가 될 때까지 상대선의 진로를 피하지 아니하여 발생한 것이나, 유지선인 D 호가 충돌을 피하기 위한 적절한 동작을 취하지 아니한 것도 원인이 된 사고이다(KMST, 2015).

양 선박의 주요 제원 및 발생시각은 Table. 5.1과 같고, 양 선박의 AIS 항적 자료를 기초로 충돌 10분 전부터 양 선박의 속력, 침로, CPA, 그리고 TCPA를 구하면 Table 5.2와 같다. 실제 항적 데이터는 양 선박의 AIS 수신 시간의 차이로 3~5초 정도 오차가 있으나 계산의 편의를 위하여 시간을 같게 하여 계산하였다.

Table 5.1 Ship' s particular of D & H

| Model ship | Ship D | Ship H |
|------------|---------------|--------|
| Type | 일반화물선 | 컨테이너선 |
| LOA(m) | 88.2 | 174.7 |
| Beam(m) | 15.6 | 30.2 |
| Draft(m) | 8 | 16.4 |
| Time | 00:09 ~ 00:19 | |

Table 5.2 Speed and Course of D & H

| 수신시간 (시:분:초) | D호 | | H호 | | CPA (mile) | TCPA (min) |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| | 속력 (kts) | 침로 (Co.) | 속력 (kts) | 침로 (Co.) | | |
| 0:09:00 | 9.4 | 20.2 | 10.6 | 83.2 | 0.33 | 21.95 |
| 0:10:00 | 9.5 | 19.0 | 10.7 | 83.0 | 0.26 | 19.51 |
| 0:11:00 | 9.7 | 16.8 | 10.7 | 84.9 | 0.29 | 16.51 |
| 0:12:00 | 9.7 | 17.0 | 10.8 | 85.8 | 0.26 | 14.44 |
| 0:13:00 | 9.5 | 17.6 | 10.7 | 86.1 | 0.23 | 12.88 |
| 0:14:00 | 9.6 | 18.2 | 10.8 | 86.3 | 0.21 | 10.99 |
| 0:15:00 | 9.3 | 18.6 | 10.7 | 85.6 | 0.33 | 10.38 |
| 0:16:00 | 9.6 | 19.0 | 10.8 | 83.8 | 0.38 | 9.02 |
| 0:16:09 | 9.7 | 19.9 | 10.8 | 80.6 | 0.11 | 8.19 |
| 0:16:19 | 9.6 | 16.8 | 10.7 | 79.3 | 0.01 | 7.57 |
| 0:16:30 | 9.5 | 11.6 | 10.5 | 76.8 | 0.12 | 6.89 |
| 0:17:00 | 9.0 | 354.4 | 10.1 | 82.3 | 0.18 | 4.91 |
| 0:17:30 | 9.1 | 352.4 | 9.3 | 94.1 | 0.03 | 3.83 |
| 0:17:40 | 9.1 | 352.4 | 8.9 | 107.0 | 0.04 | 3.29 |
| 0:18:00 | 8.9 | 346.9 | 8.5 | 120.3 | 0.11 | 2.38 |
| 0:18:30 | 8.7 | 330.8 | 8.4 | 142.6 | 0.13 | 1.34 |
| 0:18:48 | 8.2 | 321.6 | 8.4 | 142.6 | 0.10 | 1.12 |
| 0:18:56 | 7.2 | 306.5 | 8.9 | 147.9 | 0.08 | 0.74 |
| 0:19:00 | 6.8 | 300.9 | 8.9 | 147.9 | 0.07 | 0.73 |

AIS 항적 자료를 이용하여 $CoRi$ 의 각 위험지수와 위험 태도에 따른 위험도, 그리고 척도 변환한 $CoRi$ 와 ES_S 를 각각 구하면 Table 5.3과 같다.

Fig. 5.1은 시뮬레이션 영상이고 Fig. 5.2는 각 위험지수를 나타내며, Fig. 5.3은 $CoRi(\rho=-1, \text{적색})$ 와 $SJ_S(H \text{ 호}, \text{청색})$ 의 충돌 위험도를 비교한 그래프다.

Table 5.3 Collision risk value of D & H

| 수신시간 시:분:초 | E_{ij} | T_{ij} | A_{ij} | $CoRi$ (Max. 100) | | | 척도변환 (Max. 1000) | | 특이사항 |
|---------------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------|---------------------|--------|------------|
| | | | | $\rho=-1$ | $\rho=0$ | $\rho=1$ | $CoRi$ | ES_S | |
| 0:09:00 | 1.45 | 0.09 | 1.22 | 3.09 | 1.97 | 1.16 | 30.5 | 0.0 | |
| 0:10:00 | 1.44 | 0.14 | 1.42 | 5.47 | 3.52 | 2.08 | 54.1 | 0.0 | |
| 0:11:00 | 1.42 | 0.23 | 1.32 | 8.27 | 5.37 | 3.21 | 81.9 | 0.0 | |
| 0:12:00 | 1.42 | 0.33 | 1.40 | 12.25 | 8.06 | 4.88 | 121.4 | 0.0 | |
| 0:13:00 | 1.42 | 0.42 | 1.50 | 16.89 | 11.29 | 6.96 | 167.4 | 0.0 | |
| 0:14:00 | 1.42 | 0.58 | 1.55 | 23.38 | 15.99 | 10.09 | 232.0 | 186.2 | |
| 0:15:00 | 1.42 | 0.62 | 1.20 | 19.66 | 13.27 | 8.26 | 195.4 | 290.6 | H호 소각 좌변침 |
| 0:16:00 | 1.44 | 0.75 | 1.08 | 21.42 | 14.55 | 9.11 | 213.3 | 453.4 | |
| 0:16:09 | 2.00 | 0.92 | 1.86 | 54.87 | 42.60 | 30.91 | 546.6 | 625.6 | VTS 양선박 호출 |
| 0:16:19 | 2.00 | 1.01 | 2.00 | 62.91 | 50.70 | 38.42 | 627.8 | 683.6 | |
| 0:16:30 | 2.00 | 1.11 | 1.89 | 64.67 | 52.56 | 40.24 | 645.3 | 739.9 | VTS와 D호 교신 |
| 0:17:00 | 1.49 | 1.43 | 1.74 | 58.54 | 46.21 | 34.18 | 584.3 | 832.2 | D호 좌선회 |
| 0:17:30 | 2.00 | 1.63 | 1.99 | 88.03 | 81.30 | 73.01 | 879.7 | 954.0 | |
| 0:17:40 | 2.00 | 1.72 | 1.98 | 90.57 | 84.98 | 77.94 | 905.1 | 1000 | H호 우선회 |
| 0:18:00 | 2.00 | 1.84 | 1.82 | 89.55 | 83.48 | 75.91 | 894.1 | 1000 | |
| 0:18:30 | 1.87 | 1.93 | 1.75 | 86.42 | 79.03 | 70.07 | 862.9 | 1000 | |
| 0:18:48 | 1.89 | 1.96 | 1.85 | 90.80 | 85.32 | 78.40 | 907.1 | 1000 | |
| 0:18:56 | 2.00 | 1.98 | 1.90 | 96.43 | 94.05 | 90.86 | 963.8 | 1000 | |
| 0:19:00 | 2.00 | 1.98 | 1.93 | 97.24 | 95.37 | 92.84 | 972.9 | 1000 | 충돌 직전 |

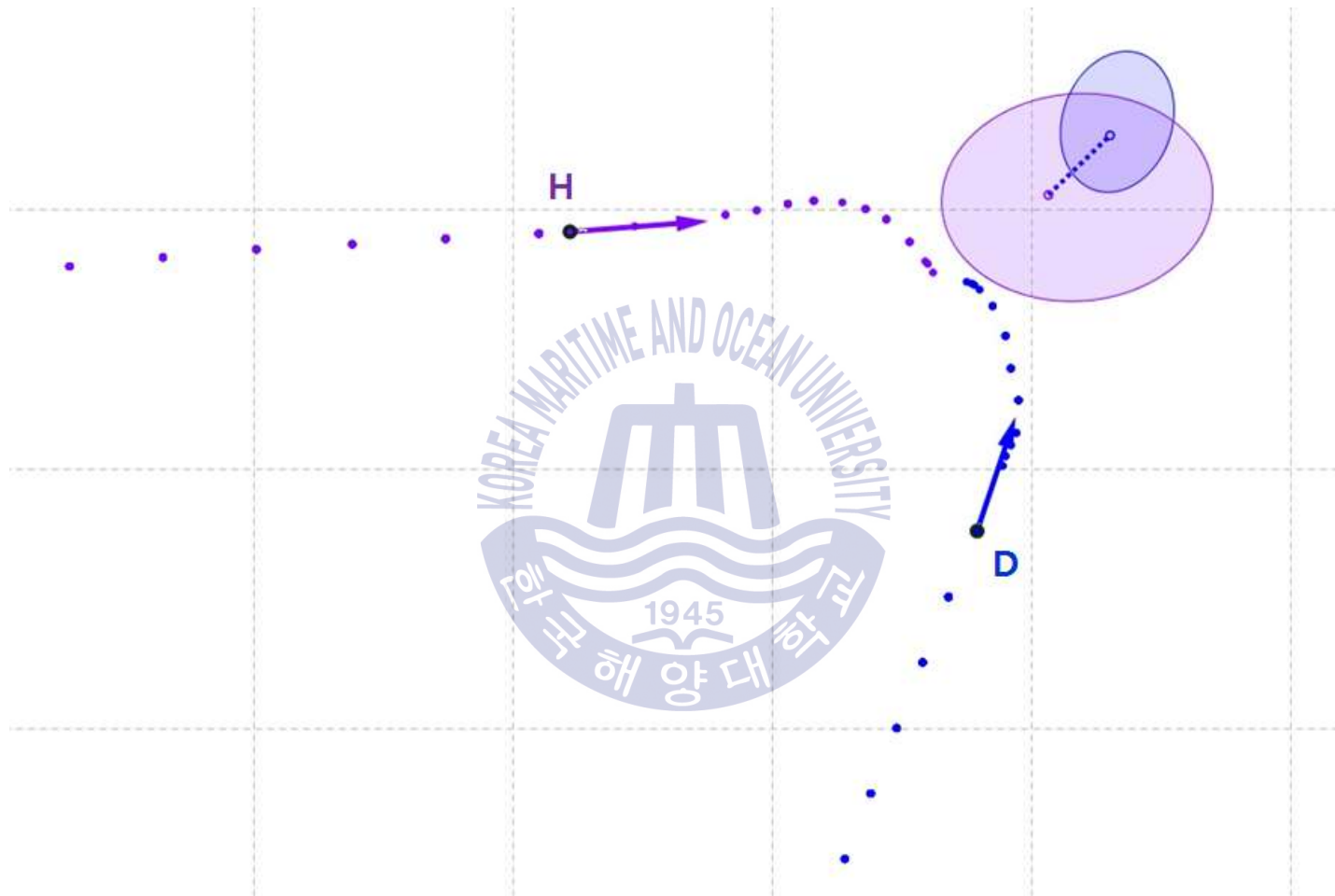


Fig. 5.1 Collision risk simulation screen for D & H

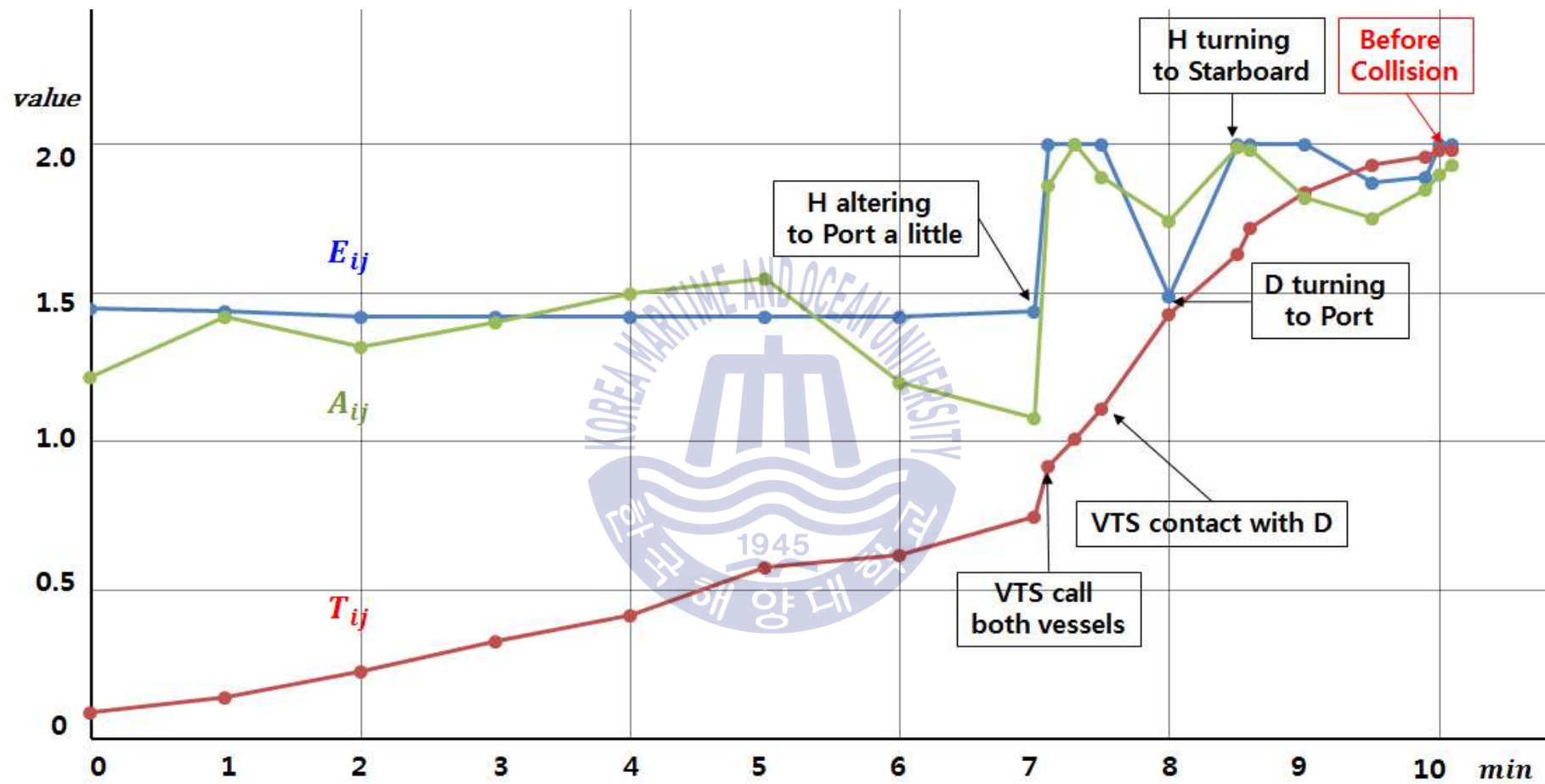


Fig. 5.2 Value E_{ij} , T_{ij} and A_{ij} according to simulation time

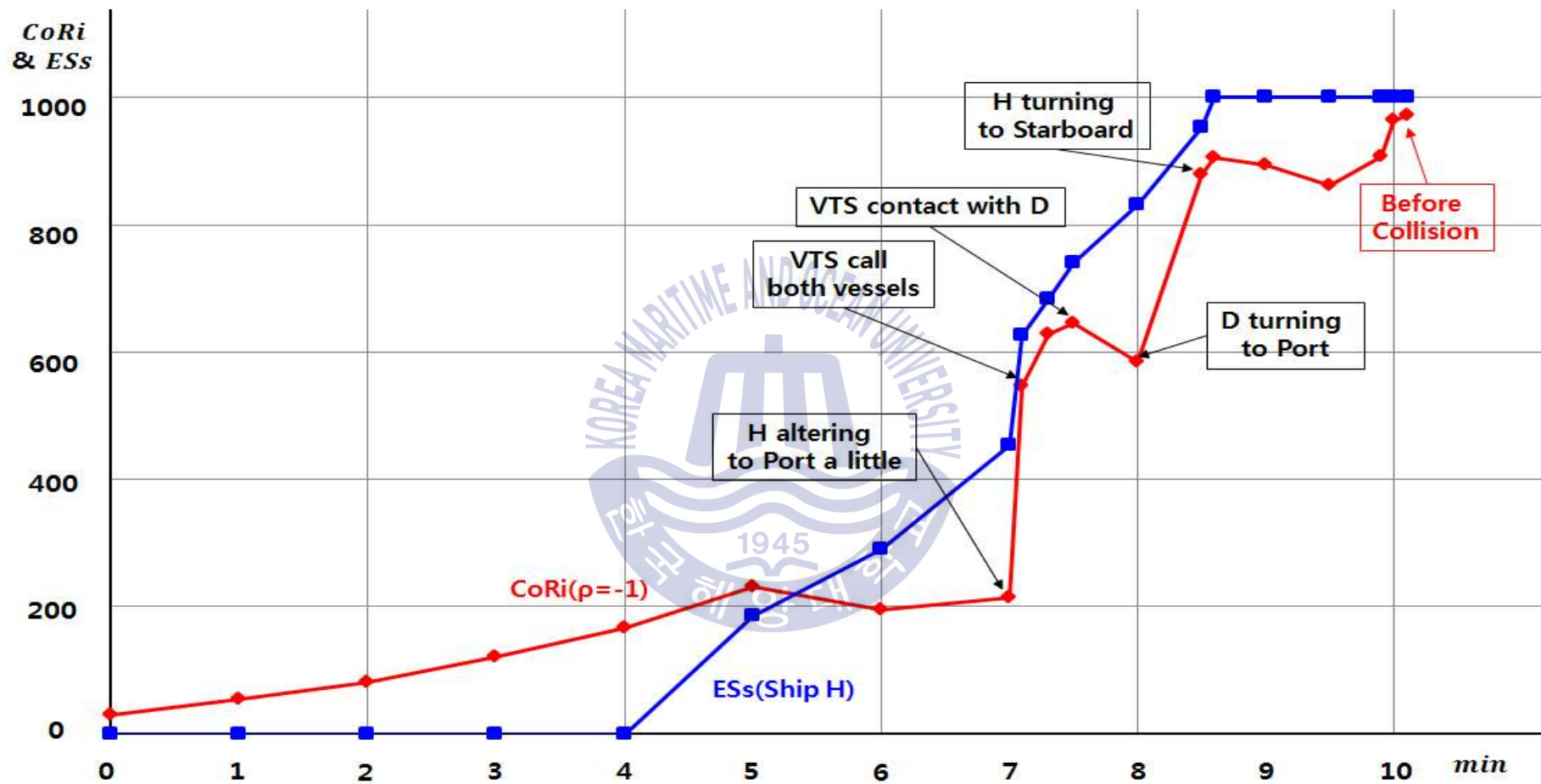


Fig. 5.3 Comparison of collision risk for $CoRi(\rho=-1)$ and $ES_s(H)$

시뮬레이션 경과 시간(분)에 따라 CoR_i 와 ES_s 의 위험도를 분석한 결과, 경과 시간 5분(충돌 7분 전)까지는 두 모델의 위험도가 200 이하로 그다지 높지 않았다.

그러나 경과 시간 7분경(충돌 5분 전) H 호(피항선)의 소각도 좌현 변침으로 두 모델의 위험도가 급격히 높아진다.

여기서 ES_s 는 양 선박의 상대 거리가 변침으로 조금 더 가까워져 위험도가 높아졌고, CoR_i 는 H 호의 좌현 변침으로 양 선박의 CPA가 0에 가까워지면서 E_{ij} 와 A_{ij} 이 커졌기 때문으로 분석된다.

이때부터 VTSO는 충돌 위험을 인지하고 양 선박을 호출하여 D 호(유지선)와 교신이 이루어지고, 8분경(충돌 3분 전) D 호가 H 호 선미를 지나기 위해 좌현 변침을 시도하지만, 충돌 2분 30초 전 H 호가 뒤늦게 우현 변침을 하게 되면서 양 선박은 결국 충돌하게 된다.

여기서 ES_s 는 일정하게 위험도가 높아져 9분경(충돌 2분 전) 최댓값이 되며, 이때 양 선박의 상대 거리(R)는 선박 길이 평균(L_m)의 약 9.0배 이하가 된다.

반면에 CoR_i 는 D 호와 H 호의 변침에 따라 위험도가 달라지며, D 호가 좌현 변침을 하여 H 호를 피하고자 하였으나 H 호가 매우 근접한 상태가 될 때까지 상대선의 의도를 확인하지 않고 우현 변침을 뒤늦게 함으로써 충돌한 당시의 사고 상황을 위험도로 잘 나타내고 있다.

5.3 관제구역 내 준사고 사례 적용

5.3.1 부산 신항 출항선과 부산항 입항선과의 준사고

이 사고는 2015년 03:30분 경 G 호(피항선)는 부산 신항을 출항하여 일본으로 향하고, P 호(유지선)는 관제구역 밖에서 울산항으로 향하는 선박으로, 양 선박이 서로의 진로를 횡단하는 상태로 CPA가 0에 가까운 상황에서 양 선박이 별다른 조치 없이 접근하여 충돌 위험이 컸던 사례이다.

양 선박의 주요 제원 및 발생시각은 Table. 5.4와 같고, 사건 당시 VTS 관제 화면은 Fig. 5.4와 같다. AIS 항적 자료를 기초로 충돌 위험 15분 전부터 양 선박의 속력, 침로, CPA 그리고 TCPA를 구하면 Table 5.5와 같다.

이를 이용하여 $CoRi$ 의 각 위험지수와 위험 태도에 따른 위험도, 그리고 척도 변환한 $CoRi$ 와 ES_5 를 각각 구하면 Table 5.6과 같다.

Fig. 5.5는 시뮬레이션 영상이고 Fig. 5.6은 각 위험지수(E_{ij} , T_{ij} , A_{ij})를 나타내며, Fig. 5.7은 $CoRi(\rho=-1, \text{적색})$ 와 $ES_5(\text{G 호, 청색})$ 의 충돌 위험도를 비교한 그래프다.

Table 5.4 Ship's particular of G & P

| Model ship | Ship G | Ship P |
|------------|---------------|--------|
| Type | 컨테이너선 | 케미컬운반선 |
| LOA(m) | 107 | 114 |
| Beam(m) | 17 | 18 |
| Draft(m) | 5.8 | 9.7 |
| Time | 03:07 ~ 03:21 | |

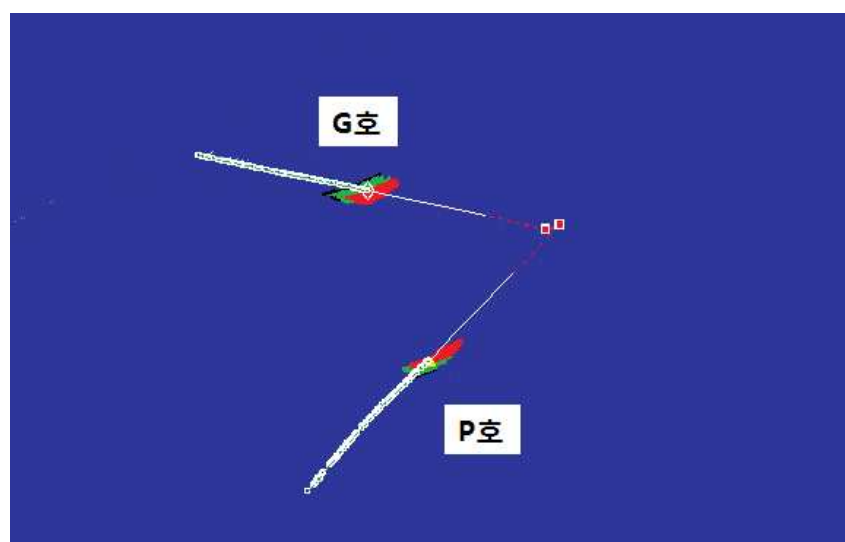


Fig. 5.4 VTS screen of G & P

Table 5.5 Speed and Course of G & P

| 수신시간 (시:분:초) | G호 | | P호 | | CPA (mile) | TCPA (min) |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| | 속력 (kts) | 침로 (Co.) | 속력 (kts) | 침로 (Co.) | | |
| 03:07:10 | 12.6 | 100.7 | 12.9 | 39.0 | 0.07 | 13.22 |
| 03:08:47 | 12.6 | 101.5 | 12.9 | 43.0 | 0.18 | 12.22 |
| 03:09:57 | 12.6 | 101.5 | 12.9 | 43.0 | 0.16 | 11.04 |
| 03:10:47 | 12.6 | 102.2 | 12.8 | 43.0 | 0.15 | 10.09 |
| 03:11:43 | 12.6 | 101.9 | 12.7 | 42.0 | 0.11 | 9.09 |
| 03:12:34 | 12.7 | 101.7 | 13.1 | 41.0 | 0.09 | 8.01 |
| 03:13:25 | 12.6 | 102.0 | 13.2 | 40.0 | 0.11 | 6.96 |
| 03:14:12 | 12.6 | 101.5 | 13.3 | 42.0 | 0.14 | 6.35 |
| 03:14:45 | 12.6 | 101.2 | 13.3 | 44.0 | 0.15 | 5.99 |
| 03:15:12 | 12.7 | 101.5 | 13.3 | 45.0 | 0.16 | 5.58 |
| 03:15:33 | 12.8 | 102.2 | 13.3 | 45.0 | 0.14 | 5.15 |
| 03:15:42 | 12.6 | 102.8 | 13.2 | 46.0 | 0.17 | 5.07 |
| 03:16:06 | 12.6 | 101.8 | 13.1 | 44.0 | 0.13 | 4.64 |
| 03:16:30 | 12.6 | 101.8 | 13.1 | 42.0 | 0.12 | 4.10 |
| 03:16:49 | 12.6 | 101.9 | 13.1 | 41.0 | 0.11 | 3.67 |
| 03:17:12 | 12.6 | 101.7 | 13.1 | 41.0 | 0.10 | 3.31 |
| 03:17:27 | 12.6 | 107.7 | 13.1 | 41.0 | 0.12 | 2.76 |
| 03:17:47 | 12.5 | 102.0 | 13.2 | 40.0 | 0.07 | 2.68 |
| 03:18:04 | 12.6 | 102.7 | 13.1 | 40.0 | 0.10 | 2.36 |
| 03:18:25 | 12.5 | 101.9 | 13.0 | 39.0 | 0.07 | 2.03 |
| 03:18:53 | 12.4 | 97.4 | 12.9 | 40.0 | 0.06 | 1.72 |
| 03:19:16 | 12.2 | 87.3 | 12.9 | 40.0 | 0.03 | 1.71 |
| 03:19:39 | 11.9 | 66.7 | 12.8 | 40.9 | 0.00 | 2.64 |
| 03:20:02 | 11.4 | 53.6 | 12.8 | 41.0 | 0.05 | 4.46 |
| 03:20:18 | 11.1 | 41.5 | 12.9 | 41.0 | 0.22 | 2.86 |
| 03:20:34 | 10.6 | 23.5 | 12.8 | 41.1 | 0.21 | -2.09 |
| 03:20:57 | 10.4 | 0.7 | 12.9 | 41.9 | 0.19 | -1.63 |
| 03:21:17 | 10.3 | 350.4 | 12.9 | 43.0 | 0.17 | -1.74 |
| 03:21:57 | 10.2 | 314.1 | 13.0 | 43.0 | 0.26 | -1.77 |

Table 5.6 Collision risk value of G & P

| 수신시간 시:분:초 | E_{ij} | T_{ij} | A_{ij} | $CoRi$ (Max. 100) | | | 척도변환 (Max. 1000) | | 특이사항 |
|---------------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------|---------------------|--------|-------------|
| | | | | $\rho=-1$ | $\rho=0$ | $\rho=1$ | $CoRi$ | ES_S | |
| 03:07:10 | 2.00 | 0.40 | 1.95 | 27.86 | 19.37 | 12.44 | 278.6 | 0.0 | |
| 03:08:47 | 1.51 | 0.47 | 1.68 | 21.76 | 14.80 | 9.28 | 217.6 | 0.0 | |
| 03:09:57 | 1.51 | 0.57 | 1.75 | 27.13 | 18.81 | 12.05 | 271.3 | 42.9 | |
| 03:10:47 | 1.51 | 0.67 | 1.78 | 31.63 | 22.31 | 14.55 | 316.3 | 160.4 | |
| 03:11:43 | 2.00 | 0.79 | 1.87 | 48.65 | 36.74 | 25.84 | 486.5 | 287.2 | |
| 03:12:34 | 2.00 | 0.93 | 1.92 | 57.05 | 44.73 | 32.83 | 570.5 | 398.2 | |
| 03:13:25 | 2.00 | 1.09 | 1.86 | 62.84 | 50.62 | 38.35 | 628.4 | 523.7 | VTs 양선박 호출 |
| 03:14:12 | 1.51 | 1.18 | 1.80 | 52.57 | 40.39 | 28.96 | 525.7 | 637.1 | P호 소각도 우변침 |
| 03:14:45 | 1.53 | 1.24 | 1.77 | 54.11 | 41.86 | 30.25 | 541.1 | 714.9 | |
| 03:15:12 | 1.53 | 1.31 | 1.73 | 55.43 | 43.14 | 31.39 | 554.3 | 772.3 | |
| 03:15:33 | 1.52 | 1.38 | 1.79 | 59.56 | 47.24 | 35.14 | 595.6 | 820.6 | |
| 03:15:42 | 1.53 | 1.39 | 1.72 | 57.91 | 45.58 | 33.60 | 579.1 | 840.6 | |
| 03:16:06 | 1.52 | 1.47 | 1.81 | 62.77 | 50.55 | 38.28 | 627.7 | 892.0 | VTs와 G호 교신 |
| 03:16:30 | 2.00 | 1.57 | 1.85 | 81.51 | 72.41 | 61.85 | 815.1 | 948.4 | P호 소각도 좌변침 |
| 03:16:49 | 2.00 | 1.64 | 1.86 | 84.23 | 76.03 | 66.28 | 842.3 | 997.4 | |
| 03:17:12 | 2.00 | 1.70 | 1.90 | 84.23 | 76.03 | 66.28 | 842.3 | 1000 | G호 소각도 좌변침 |
| 03:17:27 | 2.00 | 1.78 | 1.85 | 87.60 | 80.69 | 72.21 | 876.0 | 1000 | |
| 03:17:47 | 2.00 | 1.80 | 1.95 | 88.60 | 82.12 | 74.09 | 886.0 | 1000 | |
| 03:18:04 | 2.00 | 1.83 | 1.90 | 92.24 | 87.48 | 81.38 | 922.4 | 1000 | VTs, G호 좌선회 |
| 03:18:25 | 2.00 | 1.88 | 1.94 | 91.81 | 86.84 | 80.49 | 918.1 | 1000 | |
| 03:18:53 | 2.00 | 1.91 | 1.97 | 94.45 | 90.88 | 86.22 | 944.5 | 1000 | |
| 03:19:16 | 2.00 | 1.91 | 1.99 | 96.28 | 93.81 | 90.50 | 962.8 | 1000 | |
| 03:19:39 | 2.00 | 1.81 | 2.00 | 97.02 | 95.00 | 92.29 | 970.2 | 1000 | |
| 03:20:02 | 2.00 | 1.48 | 1.97 | 94.08 | 90.31 | 85.39 | 940.8 | 0.0 | G호 좌선회 시작 |
| 03:20:18 | 1.08 | 0.11 | 1.45 | 81.76 | 72.74 | 62.25 | 817.6 | 0.0 | |
| 03:20:34 | 1.43 | 0.00 | 1.58 | 3.26 | 2.08 | 1.23 | 32.6 | 0.0 | 충돌 위험 감소 |
| 03:20:57 | 1.49 | 0.00 | 1.66 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | |
| 03:21:17 | 1.46 | 0.00 | 1.71 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | |
| 03:21:57 | 1.27 | 0.00 | 1.33 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | |

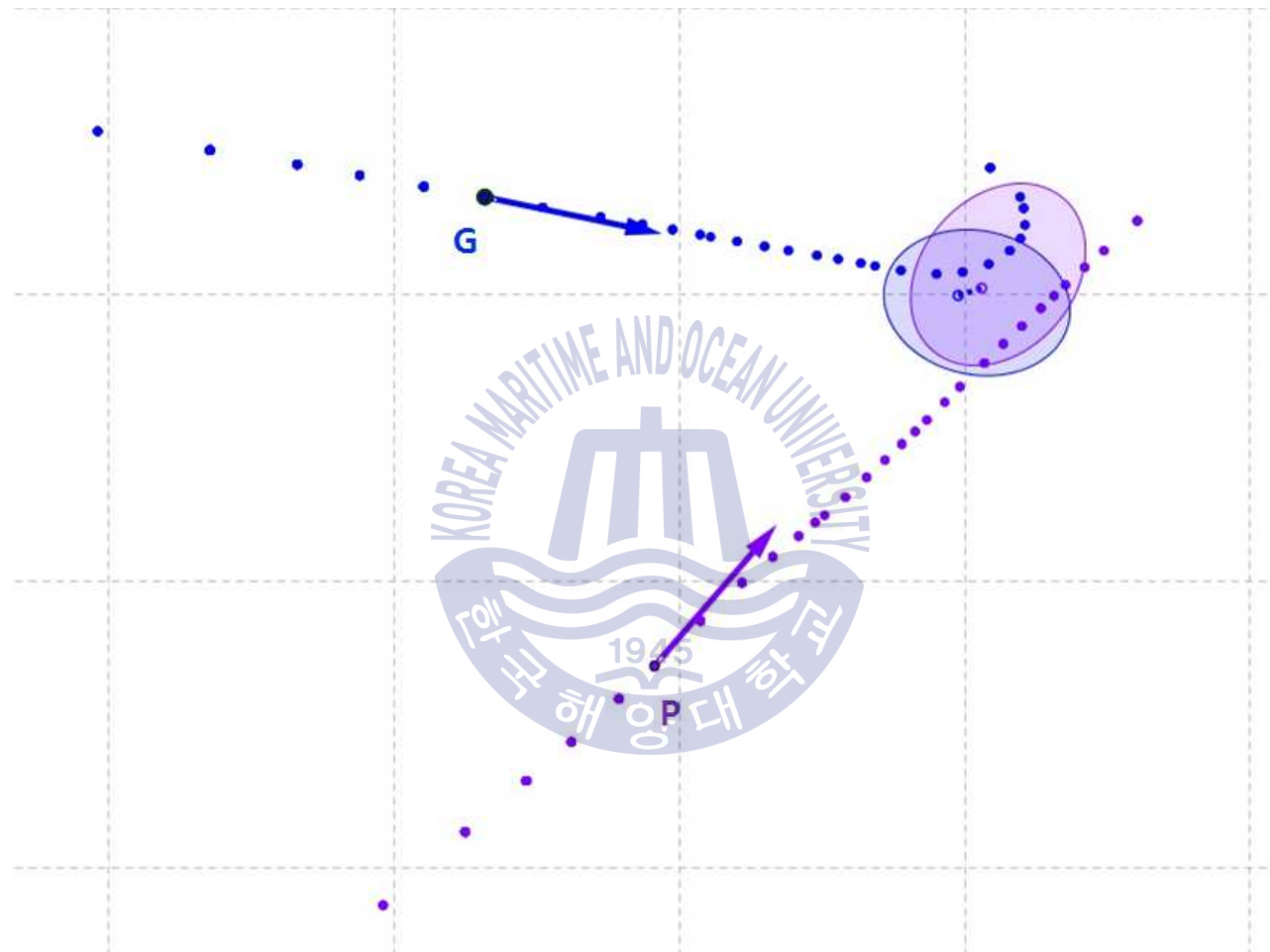


Fig. 5.5 Collision risk simulation screen for G & P

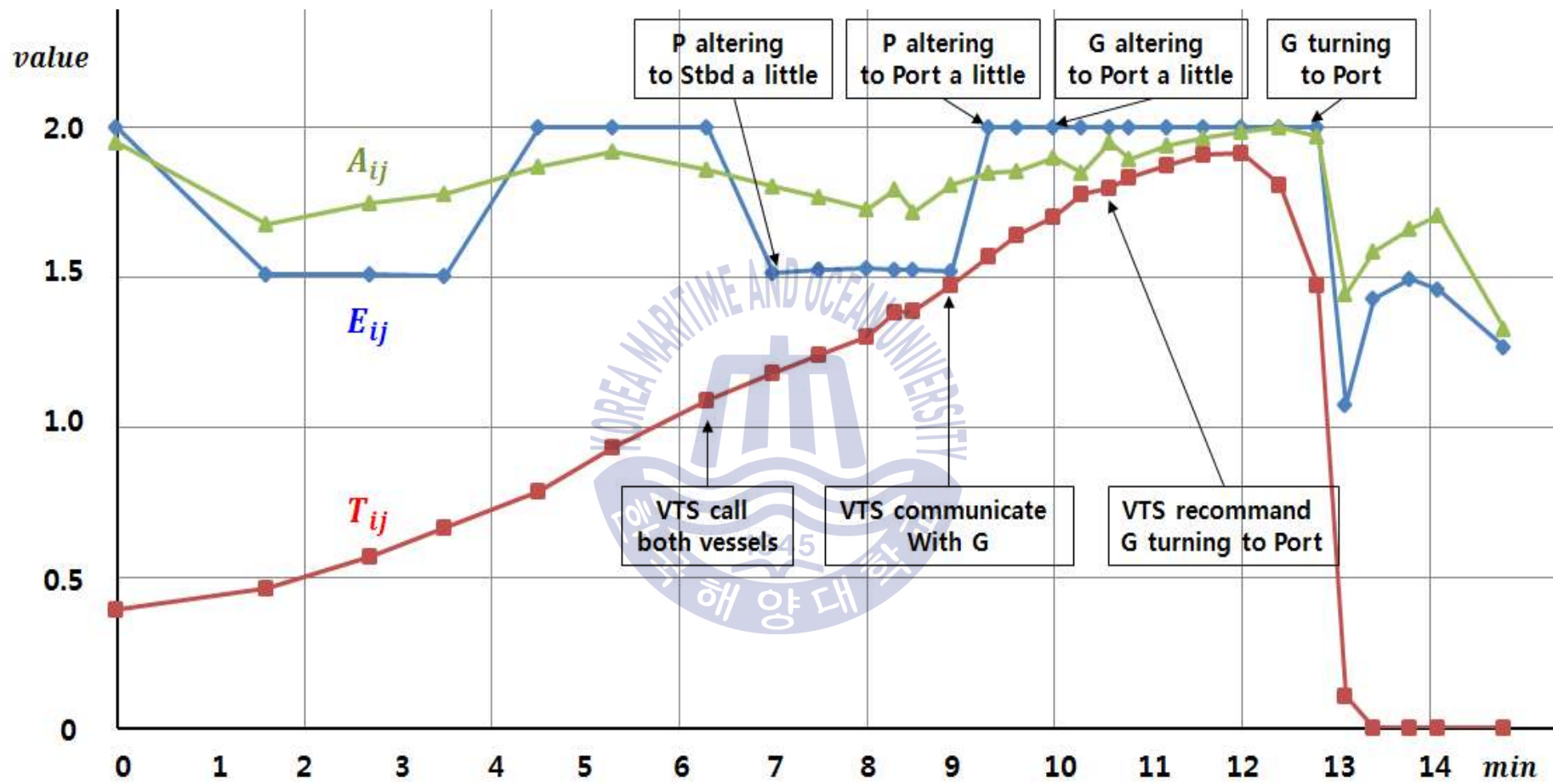


Fig. 5.6 Value E_{ij} , T_{ij} and A_{ij} according to simulation time

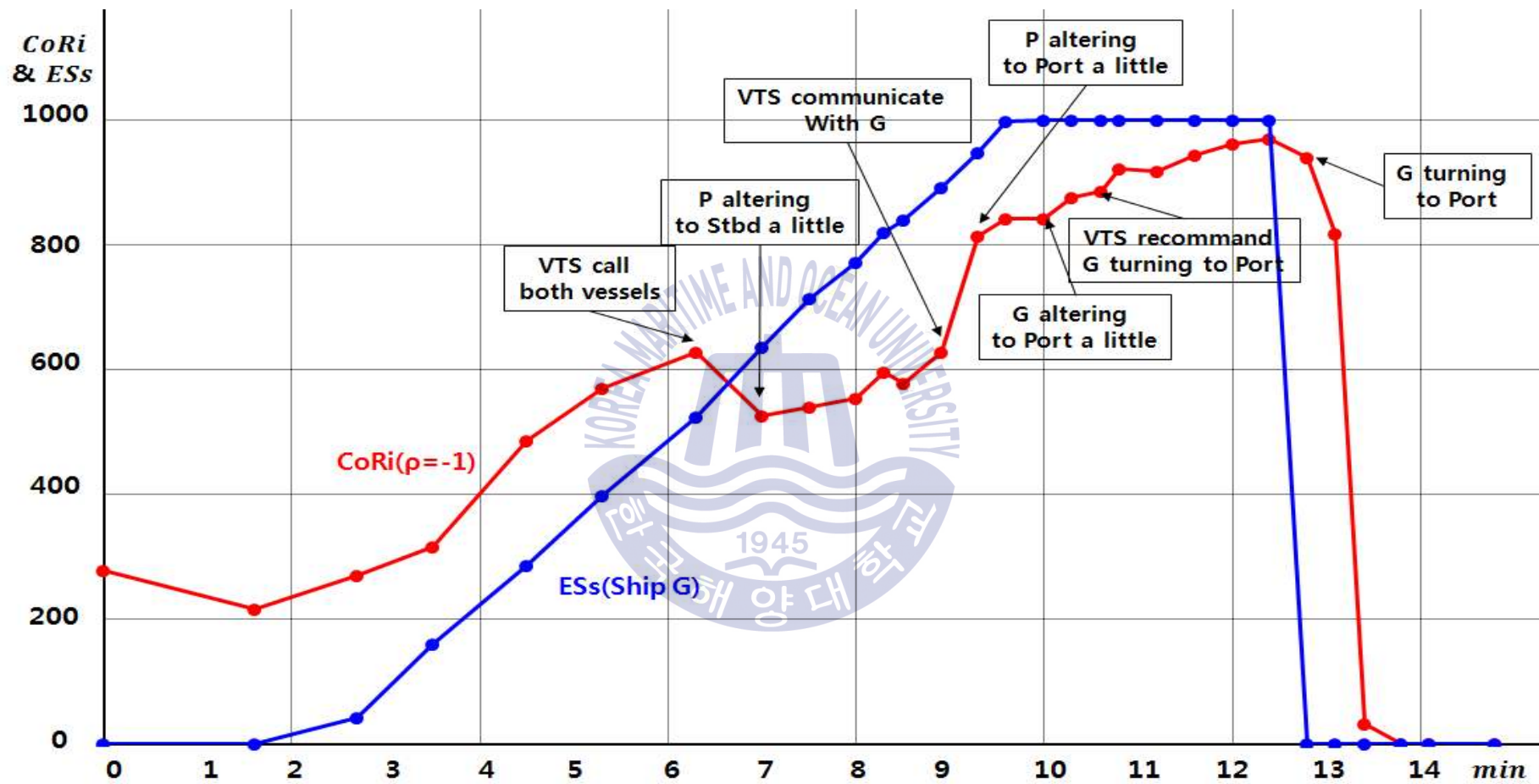


Fig. 5.7 Comparison of collision risk for $CoRi(\rho=-1)$ and $ES_s(G)$

시뮬레이션 경과 시간(분)에 따라 $CoRi$ 와 ES_s 을 분석한 결과, Crossing 상태에 있는 양 선박은 CPA가 0에 가까운 상황에서 별다른 조치 없이 접근하며, 6.3분경 VTSO가 VHF(Ch. 16)로 양 선박을 호출하나 모두 응답하지 않는다.

7분경 P 호(유지선)가 소각도 우현 변침하여 CPA가 $L_i + L_j$ (약 0.12 NM)보다 커져 E_{ij} 와 A_{ij} 의 값이 작아져 $CoRi$ 도 감소하였으나, 그 외에 별다른 조치 없이 계속 접근하다가 약 9.2분경 P 호가 다시 소각도 좌현 변침하여 E_{ij} 와 A_{ij} 의 값이 커지고 $CoRi$ 도 증가한다.

VTSO는 양 선박을 호출하여 약 9분경 G 호(피항선)와 최초 교신이 이루어져 통과 의도를 확인한다. G 호는 P 호가 우현 선수에 가깝게 위치하고 있어 좌현 변침으로 상대 선박을 피하기로 하고 약 10분경부터 좌현 변침을 시작한다. 그러나 VTSO는 G 호를 다시 호출하여 완전히 좌선회하여 안전하게 통과할 것을 권고하고 13분경부터 G 호가 좌현으로 선회하면서 충돌 위험을 피하게 된다.

Fig. 5.7에서 ES_s 는 양 선박이 접근함에 따라 위험도가 일정하게 증가하다가 약 10분경부터 최댓값이 된다. 반면에 $CoRi$ 는 P 호와 G 호의 변침에 따라 위험도가 증감할 뿐 아니라 13분경 G 호가 좌현으로 선회하면서 충돌 위험을 회피하였다고 판단되는 시점까지 일정 기간 위험도가 유지되다가 감소하기 시작하여 당시의 상황을 잘 나타내고 있다.

5.3.2 부산항 출항선과 부산 신항 입항선과의 준사고

이 사고는 2016년 18:30분경 M 호(유지선)는 부산을 출항하여 광양으로 향하고, C 호(피항선)는 부산항 관제구역을 통과 부산 신항으로 입항하는 선박으로, 양 선박이 서로의 진로를 횡단하는 상태로 CPA가 0에 가까운 상황에서 양 선박이 별다른 조치 없이 접근하여 충돌 위험이 컸던 사례이다.

양 선박의 주요 제원 및 발생시각은 Table. 5.7과 같고, 사건 당시 VTS 관제 화면은 Fig. 5.8과 같다. AIS 항적 자료를 기초로 충돌 위험 20분 전부터 각 선박의 속력, 침로, CPA, TCPA를 구하면 Table 5.8과 같다.

이를 이용하여 *CoRi*의 각 위험지수와 위험 태도에 따른 위험도, 그리고 척도 변환한 *CoRi*와 *ES_S*를 각각 구하면 Table 5.9와 같다.

Fig. 5.9는 시뮬레이션 영상이고 Fig. 5.10은 각 위험지수(E_{ij} , T_{ij} , A_{ij})를 나타내며, Fig. 5.11은 *CoRi*($\rho=-1$, 적색)와 *ES_S*(G 호, 청색)의 충돌 위험도를 비교한 그래프다.

Table 5.7 Ship' s particular of M & C

| Model ship | Ship M | Ship C |
|------------|---------------|--------|
| Type | 컨테이너선 | 컨테이너선 |
| LOA(m) | 172 | 114 |
| Beam(m) | 28 | 20 |
| Draft(m) | 7.2 | 5.5 |
| Time | 18:19 ~ 18:42 | |

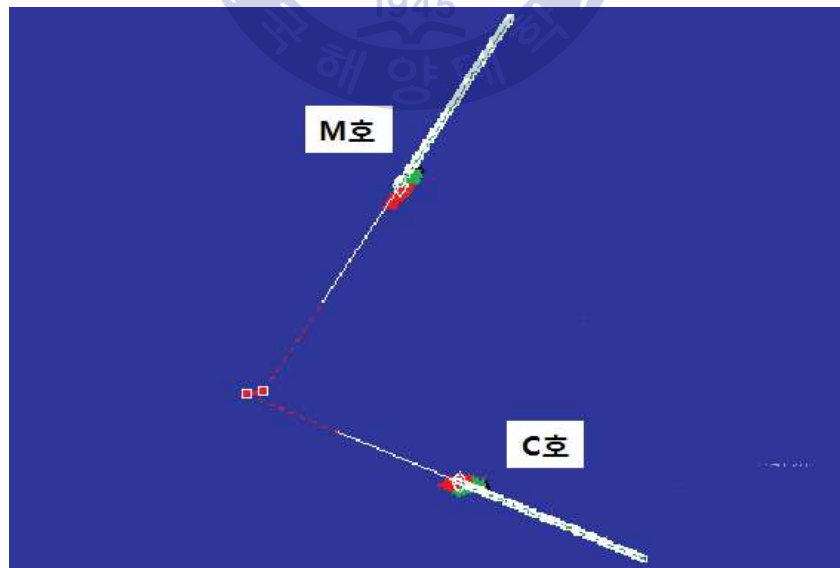


Fig. 5.8 VTS screen of M & C

Table 5.8 Speed and Course of M & C

| 수신시간 (시:분:초) | M호 | | C호 | | CPA (mile) | TCPA (min) |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| | 속력 (kts) | 침로 (Co.) | 속력 (kts) | 침로 (Co.) | | |
| 18:19:56 | 15 | 211 | 14 | 295 | 0.09 | 19.21 |
| 18:21:08 | 16 | 211 | 14 | 292 | 0.14 | 17.87 |
| 18:22:20 | 16 | 211 | 14 | 293 | 0.17 | 16.58 |
| 18:23:32 | 16 | 211 | 14 | 293 | 0.13 | 15.39 |
| 18:24:44 | 16 | 211 | 14 | 292 | 0.00 | 14.17 |
| 18:25:56 | 16 | 211 | 14 | 293 | 0.00 | 12.84 |
| 18:27:08 | 16 | 212 | 14 | 293 | 0.03 | 11.80 |
| 18:28:21 | 16 | 212 | 14 | 293 | 0.08 | 10.50 |
| 18:29:33 | 16 | 212 | 14 | 294 | 0.09 | 9.18 |
| 18:30:45 | 16 | 211 | 14 | 294 | 0.03 | 7.81 |
| 18:31:57 | 16 | 211 | 14 | 294 | 0.01 | 6.49 |
| 18:33:09 | 16 | 212 | 14 | 294 | 0.03 | 5.39 |
| 18:34:15 | 16 | 211 | 14 | 293 | 0.04 | 4.22 |
| 18:34:45 | 16 | 212 | 14 | 293 | 0.04 | 3.70 |
| 18:35:14 | 16 | 212 | 14 | 288 | 0.12 | 3.33 |
| 18:35:43 | 16 | 211 | 13 | 277 | 0.13 | 3.43 |
| 18:36:11 | 16 | 212 | 14 | 275 | 0.22 | 3.09 |
| 18:36:40 | 16 | 212 | 14 | 267 | 0.28 | 2.81 |
| 18:37:09 | 16 | 212 | 13 | 265 | 0.22 | 2.51 |
| 18:37:38 | 16 | 211 | 13 | 264 | 0.25 | 2.04 |
| 18:38:07 | 16 | 218 | 14 | 265 | 0.21 | 1.60 |
| 18:38:35 | 16 | 233 | 14 | 264 | 0.14 | 2.12 |
| 18:39:04 | 16 | 241 | 13 | 267 | 0.11 | 2.31 |
| 18:39:34 | 17 | 252 | 12 | 251 | 0.20 | 1.22 |
| 18:40:02 | 17 | 258 | 10 | 215 | 0.21 | -0.71 |
| 18:40:31 | 16 | 255 | 9 | 182 | 0.22 | -1.03 |
| 18:41:01 | 15 | 240 | 9 | 158 | 0.30 | -1.39 |
| 18:41:29 | 15 | 227 | 8 | 119 | 0.44 | -1.34 |

Table 5.9 Collision risk value of M & C

| 수신시간 시:분:초 | E_{ij} | T_{ij} | A_{ij} | $CoRi$ (Max. 100) | | | 척도변환 (Max. 1000) | | 특이사항 |
|---------------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------|---------------------|--------|----------------|
| | | | | $\rho=-1$ | $\rho=0$ | $\rho=1$ | $CoRi$ | ES_S | |
| 18:19:56 | 2 | 0.14 | 1.94 | 10.65 | 6.97 | 4.20 | 106.5 | 0.0 | |
| 18:21:08 | 2 | 0.18 | 1.85 | 12.70 | 8.37 | 5.08 | 127.0 | 0.0 | |
| 18:22:20 | 1.37 | 0.23 | 1.79 | 10.60 | 6.93 | 4.18 | 106.0 | 0.0 | |
| 18:23:32 | 2 | 0.28 | 1.87 | 19.25 | 12.98 | 8.06 | 192.5 | 0.0 | |
| 18:24:44 | 2 | 0.34 | 2 | 24.88 | 17.11 | 10.86 | 248.8 | 0.0 | |
| 18:25:56 | 2 | 0.43 | 2 | 30.52 | 21.43 | 13.91 | 305.2 | 0.0 | |
| 18:27:08 | 2 | 0.51 | 1.99 | 35.57 | 25.47 | 16.88 | 355.7 | 0.0 | |
| 18:28:21 | 2 | 0.63 | 1.95 | 41.95 | 30.81 | 21.00 | 419.5 | 0.0 | |
| 18:29:33 | 2 | 0.78 | 1.94 | 50.09 | 38.07 | 26.96 | 500.9 | 0.0 | |
| 18:30:45 | 2 | 0.97 | 1.99 | 60.72 | 48.42 | 36.25 | 607.2 | 0.0 | M호 C호 호출 |
| 18:31:57 | 2 | 1.18 | 2 | 70.33 | 58.80 | 46.58 | 703.3 | 113.0 | |
| 18:33:09 | 2 | 1.36 | 1.99 | 78.00 | 67.93 | 56.60 | 780.0 | 357.5 | VTS C호출(Ch.10) |
| 18:34:15 | 2 | 1.56 | 1.99 | 85.43 | 77.66 | 68.33 | 854.3 | 604.5 | |
| 18:34:45 | 2 | 1.65 | 1.99 | 88.43 | 81.87 | 73.77 | 884.3 | 721.4 | C호 좌현변침 |
| 18:35:14 | 2 | 1.7 | 1.89 | 87.48 | 80.51 | 71.99 | 874.8 | 829.7 | M호 선수통과 시도 |
| 18:35:43 | 2 | 1.68 | 1.88 | 86.42 | 79.02 | 70.06 | 864.2 | 903.2 | |
| 18:36:11 | 1.59 | 1.71 | 1.67 | 68.42 | 56.65 | 44.35 | 684.2 | 955.3 | |
| 18:36:40 | 1.61 | 1.71 | 1.53 | 64.93 | 52.83 | 40.51 | 649.3 | 1000 | |
| 18:37:09 | 1.61 | 1.77 | 1.67 | 70.85 | 59.39 | 47.20 | 708.5 | 1000 | |
| 18:37:38 | 1.61 | 1.8 | 1.6 | 69.66 | 58.04 | 45.79 | 696.6 | 1000 | |
| 18:38:07 | 1.63 | 1.86 | 1.71 | 75.44 | 64.80 | 53.06 | 754.4 | 1000 | M호 우변침 |
| 18:38:35 | 2 | 1.81 | 1.85 | 89.74 | 83.77 | 76.29 | 897.4 | 1000 | |
| 18:39:04 | 2 | 1.8 | 1.91 | 91.29 | 86.05 | 79.41 | 912.9 | 1000 | |
| 18:39:34 | 1.02 | 1.24 | 1.64 | 36.25 | 26.02 | 17.30 | 362.5 | 1000 | C호 좌선회 |
| 18:40:02 | 1.31 | 0 | 1.66 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 1000 | |
| 18:40:31 | 1.28 | 0 | 1.64 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | |
| 18:41:01 | 1.26 | 0 | 1.39 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | |
| 18:41:29 | 1.11 | 0 | 0.95 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | |

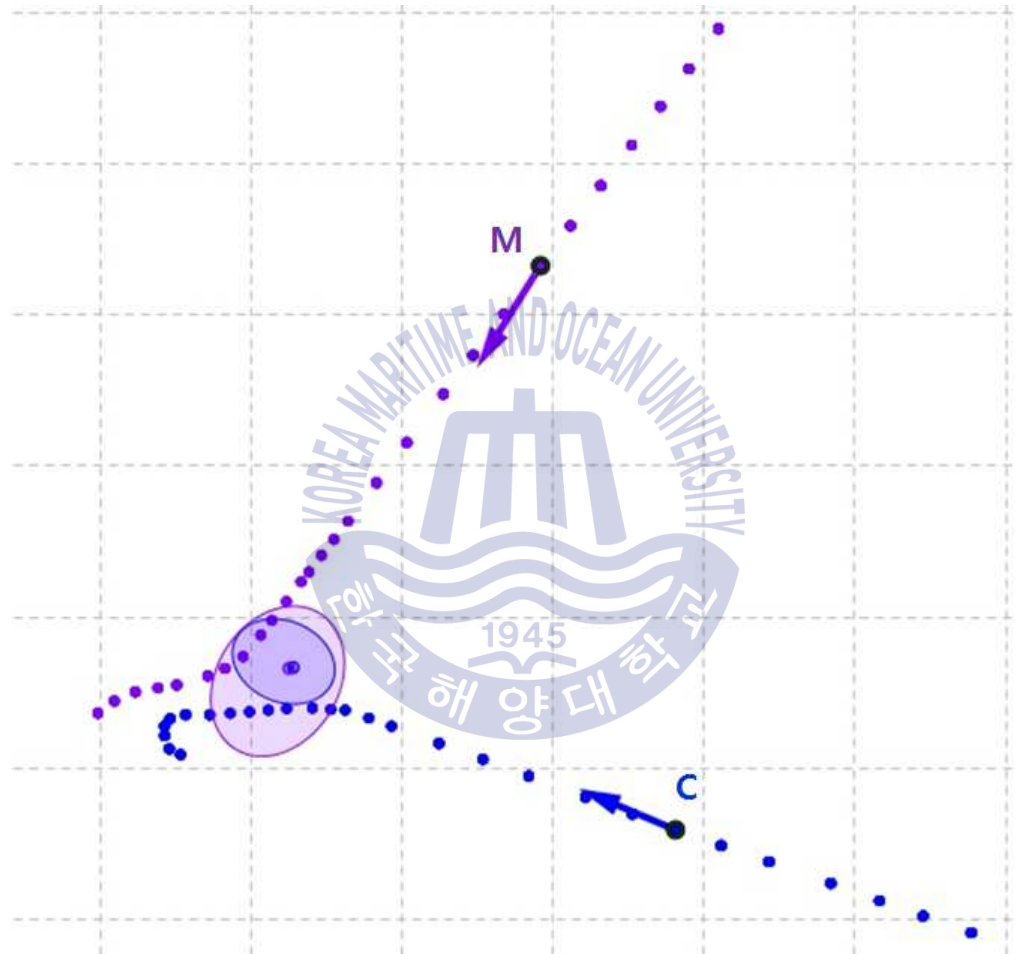


Fig. 5.9 Collision risk simulation screen for M & C

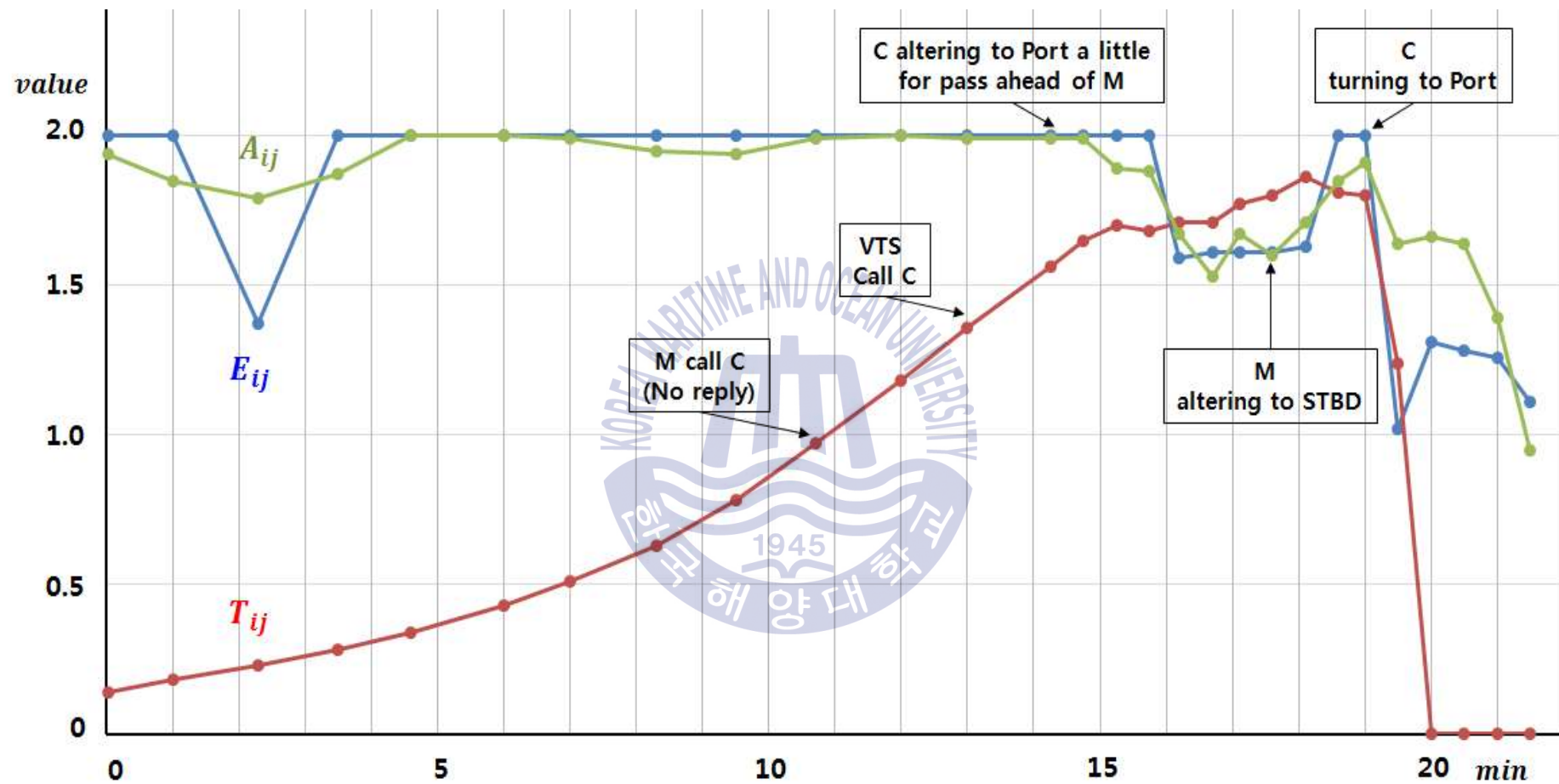


Fig. 5.10 Value E_{ij} , T_{ij} and A_{ij} according to simulation time

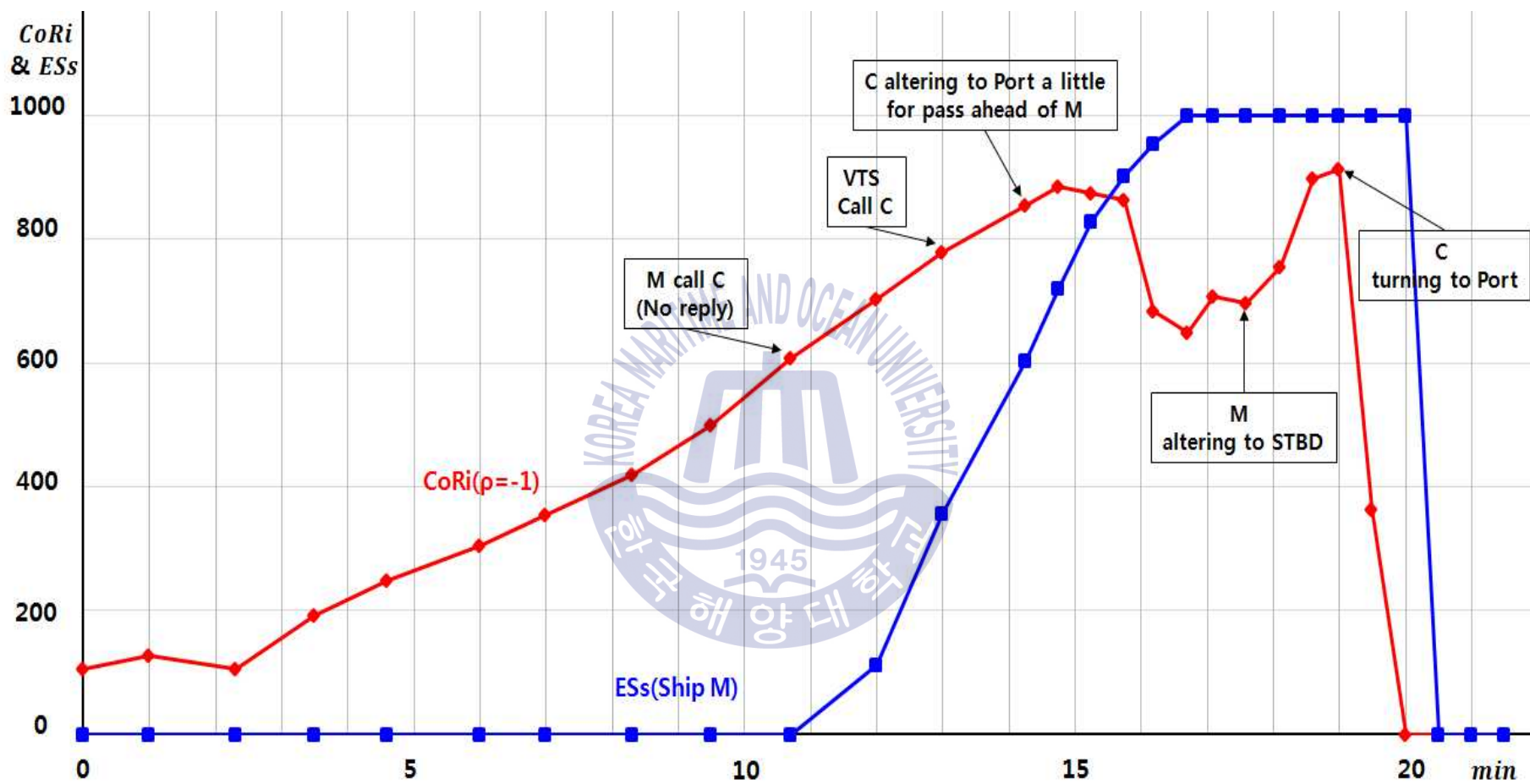


Fig. 5.11 Comparison of collision risk for $CoRi(\rho=-1)$ and $ES_S(M)$

양 선박의 당시 상황을 요약하면, Crossing 상태에 있는 양 선박은 CPA가 0에 가까운 상황에서 별다른 조치 없이 접근하다가 18시 30분경 M 호(유지선)가 C호(피항선)를 VHF CH. 16에서 호출하였으나 응답하지 않는다. 이에 18시 33분경 VTSO는 C 호(피항선)가 다른 VHF 채널을 청취하고 있을 수 있다고 판단하여 CH. 10에서 C 호를 호출하여 CH. 16에서 양 선박이 서로 교신할 수 있도록 조치한다.

18시 34분경 CH. 16에서 C 호(피항선)는 신항으로 향하고 있으므로 M 호 선수를 통과하겠다고 일방적인 통보를 한 뒤, C 호는 소각도 좌현 변침을 한다. 그러나 M 호는 속력과 침로를 그대로 유지한 채 계속해서 접근하게 되고, 18시 38분경 M 호가 조금씩 우현 변침을 함으로써 C 호는 M 호 선수를 통과할 수 없다고 판단하여 18시 39분경 좌현 전타를 하여 선회를 하게 된다.

시뮬레이션 경과 시간(분)에 따라 $CoRi$ 와 ES_5 를 분석한 결과, ES_5 는 경과 시간 10분까지 위험도가 0으로 별다른 변화가 없다가 이후부터 위험이 증가한다. 이는 충돌 위험 9분 전까지는 M 호(유지선)와 C 호(피항선)의 상대 거리가 충분하다고 계산된 결과로, 자선과 타선 길이의 평균에서 기준화한 타선과의 상대 거리(R/L_m)가 33.5가 된다. 그러나 경과 시간 11분경부터 M 호는 충돌위험을 인지하여 C 호를 호출하고 응답이 없자 13분경 VTSO는 양 선박이 서로 교신할 수 있도록 조치를 한다.

$CoRi$ 는 경과 시간 2분경 양 선박의 CPA가 0.17로 $L_i + L_j$ (약 0.15 NM)보다 커져 E_{ij} 와 A_{ij} 의 값이 일시적으로 작아져 위험도가 감소하다가 이후 CPA가 0에 가깝게 유지되면서 위험도는 계속 증가한다. 경과 시간 11분경 M호 가 C호를 VHF로 호출하지만 C 호는 응답하지 않으며, 이때 위험도는 600 이상을 나타내고 있다. 그리고 14분경 C 호가 M 호 선수를 통과하기로 교신하고 좌현 변침을 하면서 E_{ij} 와 A_{ij} 의 값이 작아지고 일시적으로 위험도도 감소한다.

그러나 M 호가 속력과 침로 변경 없이 그대로 접근하면서 다시 위험도가 증가하다가 M 호가 우현 변침을 하면서 위험도는 급격히 높아진다. 이후 C 호는 M 호의 선수를 지날 수 없다고 판단하고 좌현 변침으로 선회하면서 위험도도

감소하게 된다.

결과적으로 *CoRi*는 양 선박의 충돌 위험 상황에서 각 선박의 의도에 따른 변침 여부, VTSO의 충돌 위험 인지와 대응에 따라 당시의 상황을 위험도로 잘 나타내고 있다.

5.4 검증 결과 종합

*CoRi*와 ES_S 를 부산항 관제구역에서 발생한 충돌사고 및 준사고 사례에 적용하여 비교한 결과, *CoRi*에서 도출된 장점과 한계는 다음과 같다.

먼저 ES_S 는 선박의 변침 여부와 관계없이 양 선박 길이의 평균에서 기준화한 타선과의 상대 거리가 가까워지면 일정하게 위험도가 증가한다. 하지만 *CoRi*는 선박의 판단 또는 VTSO의 권고에 따라 선박이 소각도 또는 대각도 변침을 하면 위험도도 그에 따라 바뀌는 것을 확인하였다. 특히, 충돌 위험이 큰 근접 상황에서 위험을 회피하고자 선박이 좌현 변침할 경우 오히려 충돌 위험을 증가시키는 주요 요인이 됨을 위험도 모델로 확인하였다.

다음으로 VTSO 또는 선박이 VHF를 통해 쌍방 간 교신을 시도한 시점을 선박 충돌 위험이 커지기 시작하는 시점이라 판단하고, 이를 중심으로 VTSO와 선박 운항자의 충돌 위험인지 범위를 확인하였다. 그 결과, ES_S 는 첫 번째와 두 번째 사례에서는 625, 527의 위험도를 보였지만 세 번째 사례에서는 0.0으로 나타났다. 반면에 *CoRi*는 첫 번째 사례에서는 546, 두 번째 사례에서는 628 그리고 세 번째 사례에서는 607로 비교적 일정한 위험도 범위를 보였다.

마지막으로 선박이 대각도 변침 또는 선회를 하면서 충돌 위험이 해소되었다고 판단될 때 위험도도 감소하는지를 비교한 결과, *CoRi*와 ES_S 두 모델 모두 위험도가 감소하였다.

하지만 양 선박의 CPA가 $L_i + L_j$ 보다 작으면 E_{ij} 가 최댓값이 되어 선박의 소각도 변침에도 값이 바뀌는 부분은 추가적인 연구가 필요하다.

끝으로 시뮬레이션 결과를 기초로 ES_S 의 위험 범위와 비교하여 *CoRi*의 위험

범위를 구하면 Table 5.10과 같다.

$CoRi(\rho = -1)$ 로 계산된 위험도가 30 이하면 근접 위험 및 충돌 위험이 없는 안전한 상태라 판단할 수 있고, 위험도가 30 이상 50 이하이면 VTSO는 해당 선박을 지속적으로 모니터링하면서 위험 증가 여부를 확인할 필요가 있다.

그리고 위험도가 50 이상이 되면 VTSO 뿐 아니라 선박 운항자도 충돌 위험성을 판단하는 범위이므로 VHF 교신 또는 가용 가능한 통신 장비를 통하여 양 선박과 교신을 시도하여 안전한 통항을 유도하여야 한다.

만약 위험도가 85 이상이 될 때까지 양 선박의 통과 의도 확인 등 필요한 안전 조치가 사전에 이루어지지 않았을 경우, 충돌 위험이 매우 큰 상황에 부닥칠 수 있으므로 각별한 주의가 요구된다.

Table 5.10 Risk ranking of ES_s and $CoRi$

| SJ : Mariner's Judgement | | ES_s | $CoRi$: VTSO's risk ($\rho = -1$) | |
|-------------------------------|----------------------------|--------|---|-----------------------|
| 0 | Extremely safe | [0] | under 30 | Safe |
| 1 | Fairly safe | | | |
| 2 | Somewhat safe | | | |
| 3 | Neither safe nor dangerous | [500] | 30 ~ 50 | Continuous Monitoring |
| 4 | Somewhat dangerous | [750] | 50 ~ 60 | Risk recognition |
| 5 | Fairly dangerous | [900] | 60 ~ 85 | Risk management |
| 6 | Extremely dangerous | [1000] | over 85 | Extremely Danger |



제 6 장 결 론

해양안전심판원 해양사고 통계에 따르면 국내에서 발생하는 충돌사고 대부분이 선박의 경계 소홀로 상대 선박을 조기에 인지하지 못하거나 선박 운항자의 운항과실로 발생하고 있다. 이러한 충돌 사고 위험을 감소시키고 선박 통항의 안전과 효율성 증진을 위하여 IMO에서는 각국의 주관청으로 하여금 VTS를 설치·운영하도록 하고 있으며, 우리나라는 국내 연안 해역의 해상교통 안전을 확보하기 위하여 현재 18개의 VTS를 설치·운영하고 있다.

선박 간 충돌 위험은 각 선박의 당직 항해사 관점에서 위험 여부를 판단하여 그에 따른 변침, 감속 등 적절한 조치를 취하는 것이 일반적이나, 국내에서 발생하는 충돌사고 대부분이 선박의 경계 소홀 등 상대 선박을 조기에 인지하지 못하여 발생하고 있다. 이러한 선박 운항자의 인적요인으로부터 발생할 수 있는 위험요소를 보완하고 관제구역을 통항하는 선박을 모니터링하며 선박 간에 발생할 수 있는 충돌 위험을 제삼자의 관점, 즉 VTSS 관점에서 사전에 예측하여 관련 정보를 해당 선박에 제공함으로써 안전한 통항을 유도하기 위한 위험도 평가모델 개발은 중요한 의미가 있다.

이에 2장에서는 국내외 해상교통 평가모델의 실행 절차 및 평가 결과를 조사하고 각 모델의 특징과 개선사항을 분석한 결과, 전문가 자문을 통하여 결과를 도출하는 정성적인 방법과 선박 교통량 및 수로 정보 등을 기초로 연간 충돌 및 좌초 위험을 예측하는 정량적인 방법, 그리고 선박 운항자의 경험과 지식을 기반으로 개발된 모델이 주를 이루고 있었다.

그러나 정성적·정량적인 모델은 실시간으로 변화하는 선박 움직임에 따른 선박 간 충돌 위험을 구하기 어려운 점이 있으며, 선박 운항자의 경험과 지식을 바탕으로 개발된 모델은 항해사의 국적과 자격에 따라 결과가 다르고 항해하는 해역이 해당 항해사에게 얼마나 친숙한지 아닌지에 따라 실제 상황과 모델 결과 값은 다를 수 있다.

따라서 선박 운항자의 인적요인으로부터 발생할 수 있는 위험을 보완하고 실

시간으로 변화하는 선박 움직임에 따른 선박 간 충돌 위험 여부를 국내 연안과 항만 대부분에 설치·운영되고 있는 VTS 측면에서 사전에 예측하여 관련 정보를 해당 선박에 제공함으로써 해상 교통의 안전을 확보하고 VTSO의 업무를 지원하는 충돌 위험도 평가모델 개발이 필요하였다.

3장에서는 VTSO가 VTS 시스템을 통해 선박 정보를 모니터링하며 충돌 위험을 인지하는 방법을 위험지수(Risk Index, R)라 정의하고, 선박 조우 상황에 따른 위험(E_{ij}), 선박 간 최단 접근시간에 따른 위험(T_{ij}) 그리고 선박 간 근접거리에 따른 위험(A_{ij})으로 분류하여 구하였다.

CPA에서의 상대방위에 따른 E_{ij} 이 VTSO 관점에서 조우 상황을 판단하기에 타당한지 아닌지를 확인하기 위하여 VTSO 84명, OoW 52명으로부터 20가지 선박 조우 상황에 대한 위험 정도를 분석한 결과, E_{ij} 와 상당히 일치함을 확인하였다.

양 선박 간 충돌 위험이 임박한 상황에서 남아 있는 시간에 따라 13가지 상황에 대하여 VTSO가 느끼는 위험의 정도를 조사한 결과, 상황별로 큰 편차 없이 남아있는 여유 시간에 따라 일정하게 위험이 상승하는 것으로 확인하고 선박 정보의 주요 요인과 세부 요인이 VTSO에게 미치는 영향 정도를 고려하여 T_{ij} 를 구하였다.

기존의 Ship domain과 관련된 연구는 현재 선박의 위치를 중심으로 한 Ship domain으로 충돌의 위험을 판단하기 어려운 부분이 있어 이를 개선하고자 Domain의 중심을 TCPA가 0인 지점, 즉 CPA로 이동하여 각 선박의 Domain과 CPA와의 관계에 따라 위험 여부를 판단하는 방법을 제안하였으며, 설문으로 VTSO의 Safety domain을 도출하여 A_{ij} 를 구하였다.

특히 양 선박의 조우 상황과 근접 거리를 현재 위치를 기준으로 계산한 것이 아니라 TCPA가 0인 지점, 즉 CPA에서의 각 선박 상대방위와 Ship domain의 근접 정도에 따라 양 선박의 조우 위험과 근접 위험을 구하여 실시간으로 변화하는 선박 움직임에 따라 사전에 충돌 위험을 예측할 수 있도록 하였다.

4장에서는 위험 인식과 관련된 국내외 연구에서 위험 주체의 관점에서 VTSO는 선박 충돌을 예방하기 위하여 선박 동정을 모니터링하며 위험을 인지하는 전문가 집단이며, MacCrimmon(1986)는 위험 인식에 영향을 미치는 세 가지 요소로 통제력, 정보, 대응 시간을 들었는데 본 논문에서는 VTSO의 위험 인식에 영향을 미치는 세 가지 요소로 선박 조우 상황, 접근 거리, 대응 시간을 들어 충돌 위험지수(Risk Index)를 구하였다.

또한, 선박 교차 상황이 같더라도 VTSO 개인에 따라 위험성을 판단하는데 차이가 있었고, VTSO의 평균 위험 정도 즉, R_i 에 대한 VTSO 개인이 느끼는 충돌 위험도를 구하기 위하여 의사결정자의 위험 태도에 따른 효용성을 계산한 함수(Ang AH-S & Tang WH, 1984)를 변환하여 VTSO의 위험 태도를 반영한 CoR_i 를 구하였다.

위험 태도는 크게 위험 회피형, 위험 중립형, 위험 감수형으로 구분하며, CoR_i 로 구한 위험도와 설문에 제시된 각 교차 상황에 대하여 VTSO 개인이 느끼는 위험 정도를 비교하여 상관관계가 높은 위험 태도를 각각 구하였다.

그 결과, 설문에 참여한 70명의 VTSO 중 55.7%가 위험 감수형, 27.1%가 위험 중립형임을 알 수 있었고, VTS 센터별로는 N 센터를 제외하고 대부분의 VTS 센터에 근무하는 VTSO가 위험 감수형으로 나타났다. 그리고 VTS 근무 경력과 승선 경력이 짧은 VTSO의 상당수가 위험 감수형으로 나타났다.

이처럼 VTSO의 위험 태도는 각 VTS 센터의 관제구역을 통항하는 선박의 선종, 교통량, 근무환경 등 다양한 요인이 영향을 미치므로 각 항만의 특성과 근무 경력 등을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

5장에서는 CoR_i 의 검증을 위하여 ES Model의 ES_s 와 함께 부산항 관제구역에서 발생한 충돌 및 준사고 사례를 이용하여 시뮬레이션을 한 결과, CoR_i 는 선박의 판단 또는 VTSO의 권고에 따라 선박이 소각도 또는 대각도 변침을 함에 따라 위험도도 증가하거나 감소하였고, 충돌 위험이 큰 근접 상황에서 위험을 회피하고자 선박이 좌현 변침을 하면 오히려 충돌 위험을 증가시키는 요인이 됨을 위험도 평가모델로 확인하였다.

VTSO 또는 선박에서 VHF를 통해 최초로 교신을 시도한 시점을 선박 충돌 위험이 커지기 시작하는 시점이라 판단하고 이를 중심으로 VTSO와 선박 운항자의 충돌 위험인지 범위를 확인한 결과, *CoRi*는 550에서 630으로 일정한 위험 범위를 나타냈으며, 선박이 대각도 변침 또는 선회를 하여 충돌 위험이 해소되었다고 판단될 때 *CoRi* 위험도도 감소하였다.

결과적으로 *CoRi*는 선박의 변침·감속으로 VTSO가 느끼는 당시 상황을 위험도로 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

부산항에 근무하는 VTSO의 위험 태도를 분석 결과, 응답자의 대부분이 위험 감수형으로 조사되었고, 시뮬레이션 결과 사전에 선박의 근접 위험을 피하고 충돌 사고 예방을 위해 부산항 VTSO의 위험 태도를 중립 또는 회피형으로 관제업무에 임하는 것이 바람직하다고 판단된다.

추후 부산항의 항로 및 방파제 인근, 정박지 등에서 발생하는 다양한 선박 교통 사례를 *CoRi*에 적용하여 충돌 위험 발생 위치와 상황별로 *RI*의 각 계수와 Ship domain을 최적화함으로써 우리나라 연안과 관제구역 내에서 발생하는 충돌 위험 상황에 대하여 다각도로 평가할 수 있는 모델로 발전시키고자 한다.

그리고 선박 관제 시뮬레이션에 *CoRi*를 적용하여 VTSO의 위험 태도를 분석하고, 이에 따른 개인별 위험 인지 범위를 구하여 신규 또는 기존 VTSO의 관제 역량 강화에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

끝으로 실제 관제 현장에서 다수의 선박이 통항하면서 발생하는 선박의 마주침, 횡단, 교차 상황에서 *CoRi*를 실시간으로 표시하고 알려줄 수 있는 시스템을 개발하고, 최종적으로 VTSO의 개인적 위험 정도 판단을 지원함으로써 국내 항만과 연안에서 발생할 수 있는 선박 충돌 사고 예방에 본 연구가 도움이 되기를 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 국민안전처 해양경비안전본부, 2016. 전국 해상교통관제 안내지
- [2] 김광일, 최운성, 정중식, 2012. IWRAP에 의한 완도해역 충돌확률 분석. 항해항만학회논문집, pp.516-518.
- [3] 김대원, 2011. 해상교통안전성 평가모델 개발을 위한 기초 연구. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교.
- [4] 김득봉, 2014. 항만과 수로의 제한속력 설정 모델 개발에 관한 연구. 박사학위논문. 부산:한국해양대학교.
- [5] 김인철, 안광, 2016. 인적요인을 고려한 연안해역 위험도 평가모델 비교·분석. 한국항해항만학회지, 40(1), pp.24-34.
- [6] 김영옥, 2008. 위험, 위기 그리고 커뮤니케이션: 현대 사회 위험, 위기, 갈등에 대한 해석과 대응. 서울: 이화여자대학교 출판부.
- [7] 김종성, 박영수, 허태영, 정재용, 박진수, 2011. 선박조우 형태를 고려한 해상교통환경평가 기초 모형 개발. 해양환경안전학회지, 17(3), pp. 227-233.
- [8] 김호일, 2006. 다변량 기초와 자료분석, 경문사.
- [9] 남해지방해양경비안전본부, 2014. 부산권해역 VTS 체계개선 기본조사설계 용역, 부산: 남해지방해양경비안전본부
- [10] 박영수, 정재용, 2014. 선박 점용영역 분석을 통한 해상교통혼잡도 고찰. 해양환경안전학회지, 20(5), pp. 535-542.
- [11] 박영수, 박상원, 조익순, 2015. 선박운항자 의식 기반 충돌 위험도 예측 모듈 개발에 관한 연구. 한국항해항만학회지, 39(3), pp.199-207.
- [12] 손남선, 김선영, 공인영, 2009. 시뮬레이션 기반 퍼지 알고리즘과 환경스트레스모델을 이용한 선박 충돌위험도 추정에 관한 연구. 한국항해항만학회지, 33(1), pp. 45-50.
- [13] 손남선, 김선영, 2010. 선박충돌사고의 AIS 데이터를 이용한 선박 충돌위험도 추정 알고리즘에 관한 연구. 한국항해항만학회지, 34(10), pp. 727-733.

- [14] 이정구, 김명수, 한송희, 2016. 관제정보 제공의 최적화 시간대에 관한 연구. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, pp.282-284
- [15] 이진석, 송재욱, 정민, 2015. 최근접점 상대방위에 따른 선박충돌위험 알고리즘 개발에 관한 연구. 한국항해항만학회지, 39(6), pp.493-498.
- [16] 유성모, 2014. 논문작성을 위한 SPSS 통계분석 쉽게 배우기, 2쇄. 황소걸음아카데미.
- [17] 엄한찬, 장운재, 조익순, 2012. 해상교통혼잡도 평가의 현황과 기술 기준 개선을 위한 연구. 선박안전기술공단.
- [18] 한국해양과학기술진흥원, 2010. 해상교통안전성 평가모델 기술개발.
- [19] 해양수산부, 2006. 부산항 인근해역 해상교통 환경평가 연구용역 최종보고서
- [20] 허태영, 박영수, 김종성, 2012. 선박운항자 해상교통위험도 모형 개발에 대한 연구. 대한교통학회지, 30(5), pp. 91-100.
- [21] Ang AH-S, Tang WH., 1984. Probability concepts in engineering planning and design: Volume II - decision, risk, and reliability. New York: Wiley and Sons.
- [22] Busan Maritime Safety Tribunal, 2015. A Written Judgment for Collision Accident between 107 DAEYANG and HYUNDAI BRIDGE.
- [23] Coldwell TG., 1983. Marine traffic behaviour in restricted waters. Journal of Navigation, 36(3), pp. 430-444.
- [24] COWI for Sofartsstyrelsen. 2008. Risk Analysis of Sea Traffic in the Area around Bornholm. Available at: <URL: <http://www.vtt.fi/files/projects/bassy/Risk-Analysis-Sea-traffic-Area-around-Bornholm-2008.pdf>>.
- [25] Davis PV, Dove MJ, Stockel CT. 1980. A computer simulation of marine traffic using domains and arenas. Journal of Navigation, 33(1), pp. 215-222.
- [26] Davis PV, Dove MJ, Stockel CT. 1982. Computer simulation of multi-ship encounters. Journal of Navigation, 35(2), pp. 347-352.
- [27] Fischhoff, B., Slovic, P., Lichtenstein, S., Read, S., & Combs, B. 1978. How safe is safe enough?: A psychometric study of attitudes towards technological risks and benefits. Policy Sciences, 9, pp. 127~152.

- [28] Fischhoff, B., Lichtenstein, S., Slovic, P., Derby, S. L., & Keeney, R. L. 1981. Acceptable risk. Cambridge: Cambridge University Press.
- [29] Fischhoff, B. 1995. Risk perception and communication unplugged: Twenty years of process. Risk Analysis, 15(2), pp. 137~145.
- [30] Fischhoff, B., & Kadvany, J. 2011. Risk: A very short introduction. New York: Oxford University Press.
- [31] Friis Hansen P., 2008. Basic Modelling Principles for Prediction of Collision and Grounding Frequencies. Technical University of Denmark.
- [32] Fujii Y, Tanaka K., 1971. Traffic capacity. Journal of Navigation, 24(4), pp. 543-552.
- [33] Fujii, Y. & Yamanouchi, H. & Mizuki, N. 1974. Some Factors Affecting the Frequency of Accidents in Marine Traffic. II. The Probability of Stranding and III. The Effect of Darkness on the Probability of Collision and Stranding. Journal of Navigation, 27(2), pp. 239-247.
- [34] Fukuto, J., Imazu, H., 2013. New collision alarm algorithm using obstacle zone by target (OZT). 9th The International Federation of Automatic Control Conference on Control Applications in Marine Systems, pp. 91-96
- [35] Gong, I. Y., 2003. "A review on the Characteristics of Environmental Stress Model for Maritime Traffic Safety Assessment", Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 27, No. 5, pp. 479-486.
- [36] Goodwin EM., 1975. A statistical study of ship domains. Journal of Navigation, 28(03), pp. 328-344.
- [37] Hwang, S. J., Eiichi K., Nobujazu W., 2014. Development of Safety Index for Evaluation of Ship Navigation. Journal of Korean Navigation and Port Research, 38(3), pp. 203-209.
- [38] IALA, 2009. IALA Recommendation O-134 on the IALA Risk Management Tool for Ports and Restricted Waterways, Edition 2.

- [39] Imazu, H., Fukuto, J., Numano, M., 2002. On an Obstacle Zone by Targets and its presentation. Journal of Japan Institute of Navigation (in Japanese), Volume 107, pp.191-197
- [40] IMO(1997), Guidelines for Vessel Traffic Services, Res. A857(20), pp. 1-2.
- [41] Inoue, K., Kubono, M., Miyasaka, M., and Hara, D. (1998a), "Modeling of Mariners' Perception of Safety when Being Faced with Imminent Danger (In Japanese)", Journal of Japan Institute of Navigation, pp. 235-245.
- [42] Inoue, K., Masua, K., and Jera, W. (1998b), "Guidelines to Assess the Safety of Marine Traffic-1 (Evaluation of Ship-handling Difficulty based on the Environmental Stress Model In Japanese)", Journal of Japan Institute of Navigation, pp. 225-234.
- [43] Inoue, K., Park, Y. S. et al. 2002. Safety Management of Vessel Traffic in Ports and Waterways. PIANC, 30th INTERNATIONAL NAVIGATION CONGRESS, S4D P65, pp. 1-12.
- [44] Inoue, K., 2013. Theory and Practice of ship handling. Sanghakdang, pp. 224-225.
- [45] Inoue, K., 2000. Evaluation Method of Ship-handling Difficulty for Navigation in Restricted and Congested Waterways. Journal of Navigation, 53(1), 167-180.
- [46] Jeong, T. G., 2003. A New Approach to the Evaluation of Collision Risk using Sech Function. Journal of Korean Navigation and Port Research, 27(2), pp. 103-110.
- [47] Jingxian Liu et al., 2015. Dynamic Ship Domain Models for Capacity Analysis of Restricted Water Channels. Journal of Navigation, pp. 1-23.
- [48] Jutta Ylitalo, 2010. Modelling Marine Accident Frequency. Aalto University, School of Science and Technology, Master's thesis, pp. 12-35.
- [49] Kayano, J., Imazu, H., 2009. A Study of a Collision Avoidance Support System. Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics San Antonio, TX, USA, pp. 244-249
- [50] Kayano, J., Yabuki, H., Ohya, K., and Imazu, H., 2011. On the Evaluation of Pilots' Manoeuvring for Collision Avoidance by Using OZT. Journal of Japan Institute of Navigation (in Japanese), Volume 124, pp.57-61.

- [51] Keeney RL, Raiffa H., 1993. Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs. Cambridge University Press.
- [52] Kim E. K., Kang I. K. and Kim Y. G., 2001. Collision Risk Decision System for Collision Avoidance. Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, 24(6), pp. 524-527.
- [53] Kim, K. I., Jung, J. S., Park, G. K., 2012. A Study on Development of Maritime Traffic Assessment Model. Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, 22(6), pp. 761-767.
- [54] Korean Maritime Safety Tribunal, 2015. Statistics of Marine Accident for the Past 5 Years, Ministry of Oceans and Fisheries, South Korea
- [55] Lee, J. S., Kim, J. H., Jang, E. K.(2016), “Analysis of VTS Operators’ Situational Awareness Based on In-Field Observation and Subjective Rating Methods “, Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 40, No. 6, pp. 375-384.
- [56] MacCrimmon, K. R.. & Wehrung, D. A., 1986. Taking risks: The management of uncertainty. New York: The Free Press.
- [57] Macduff, T., 1974. The probability of vessel collisions. Ocean Industry. pp. 144-148.
- [58] Park, J. S., Park, Y. S., Lee, H. G., 2013. Maritime Traffic Engineering. pp. 163~167
- [59] Park, Y. S., J. Y. Jeong and J. S. Kim, 2010. A study on the Minimum Safety Distance between Navigation Vessels based on Vessel Operator’s Safety Consciousness. Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 16(4), pp. 401-406.
- [60] Park, Y. S., Park, J. S., Inoue. K., 2012. A Study on Monitoring System for Ship Collision Danger, Proceeding of KIIS Spring Conference, 22(1), pp. 149-150.
- [61] Park, Y. S., Kim, J. S., Kim, C. S., Jeong, J. Y., Lee, H. K. and Jeong, E. S.(2013) A Study on the Marine Traffic Risk Assessment by using Ship Handling Simulator, Journal of Korean Society of Marine Environment, Vol.19 No.2 pp. 138-144.
- [62] Pedersen, P.T. 1995. Collision and Grounding Mechanics. Proceedings of WEMT’ 95. Copenhagen. The Danish Society of Naval Architects and Marine Engineers, pp. 125-157.

- [63] Pedersen, P. T. & Zhang, S. 1999. Collision Analysis for MS Dextra. SAFER EURORO Spring Meeting, Nantes, France, 28.4.1999. Paper No. 2, pp. 1-33.
- [64] Q. Xu, N. Wang, 2014. A Survey on Ship Collision Risk Evaluation. *Traffic&Transportation*, 26(6), pp. 475-486.
- [65] Renn, O., & Levine, D., 1991. Credibility and trust in risk communication. In R. E. Kasperson & P. J. M.
- [66] Son, N. S., Kim, S. Y., Gong, I. Y.(2009), “Study on the Estimation of Collision Risk of Ship in Ship Handling Simulator using Fuzzy Algorithm and Environmental Stress Model “, *Journal of Korean Navigation and Port Research*, Vol. 33, No. 1, pp. 43-50.
- [67] Song, B. H., Lee, K. H., et al, 2011. Bayesian Collision Risk Estimation Algorithm for Efficient Collision Avoidance against Multiple Traffic Vessels. *The Journal of the Korean Institute of Communication Sciences*, 36(3), pp. 248-253.
- [68] Statistics of Collision near Korea port, <http://kmast.go.kr/statrics/>
- [69] Szlapczynski, R., 2006. A Unified Measure Of Collision Risk Derived From The Concept Of A Ship Domain. *Journal of Navigation*, 59(3), pp. 477-490.
- [70] Szlapczynski, R., Szlapczynska, J., 2016. An analysi of domain based ship collision risk parameters. *Ocean Engineering*, 126, pp. 47-56.
- [71] The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. 2014. PIANC Report No. 121 Harbour Approach Channels Design Guidelines, pp. 118
- [72] T. X. Nguyen et al., 2015. A Comparison of ES and PARK Maritime Traffic Risk Assessment Models in a Korean Waterway. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 21(3), pp. 264-252.
- [73] USCG, 2005. Ports and Waterways Safety Assessment Workshop Guide, Chapter 2.
- [74] USCG, 2009. Ports and Waterways Safety Assessment Workshop Report, Houston/Galveston, Texas.
- [75] You Dong, Dan M. Frangopol., 2015. Probabilistic ship collision risk and sustainability assessment considering risk attitudes. *Structural Safety* 53, pp. 75-84.

[76] http://www.iala-aism.org/wiki/iwrap/index.php/Predicting_Collision_Frequencies [updated on 12 March 2010]

[77] http://en.wikipedia.org/wiki/Risk_aversion [updated on 28 May 2017]



부록 I. 조우상황(방위)에 따른 선박충돌위험도 연구 설문지

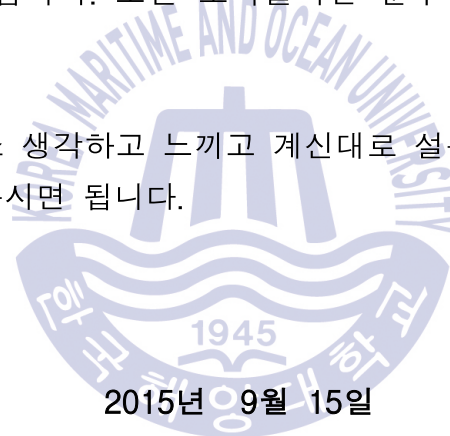
안녕하십니까?

본 설문조사의 목적은 개별 선박의 관점이 아닌 제 3자(VTS)의 관점에서 선박조우 상황에 따른 충돌위험도를 조사하기 위한 설문입니다.

교통 환경은 항만에 인접한 연안 해역을 기준으로 양 선박이 제시된 설문의 그림과 같이 통과할 때, 응답자가 느끼는 위험의 정도를 표시하시면 됩니다.

이 조사는 무기명으로 실시되고, 그 결과는 통계적으로 처리되므로 개인의 응답 내용은 절대 비밀이 보장됩니다. 또한 조사결과는 순수한 학술목적 이외에는 사용되지 않습니다.

설문내용에서 본인이 평소 생각하고 느끼고 계신대로 설문 그림의 상황이 전개될 시 위험의 정도를 표기하여 주시면 됩니다.



2015년 9월 15일

* 지도교수

한국해양대학교 항해학부 송재욱

* 설문조사 담당자

한국해양대학교 대학원 항해학과(박사과정) 이진석

* 설문관련 문의처

☎ 010-5093-2414

e-mail : js_lee@kmou.ac.kr

1. 기초 자료 조사

1. 귀하의 성별은?

- ① 남자 ② 여자

2. 귀하의 연령은?

- ① 20대 ② 30대 ③ 40대 ④ 50대 ⑤ 60대 이상

3. 귀하께서 재직하시는 분야의 근무경력은?

- ① 5년 이하 ② 6년 ~ 10년 ③ 11년 ~ 15년 ④ 16년 ~ 20년 ⑤ 21년 이상

4. 귀하가 근무하는 분야는?

- ① 해운선사 ② 항해사(선장 포함) ③ VTS ④ 기타

5. 귀하의 직책은?

- ① 부장, 과장 이상 ② 대리, 사원 ③ 선장 ④ 1등 항해사 ⑤ 2등, 3등 항해사
⑥ 관제센터장 ⑦ 관제팀장 ⑧ 관제사 ⑨ 기타()

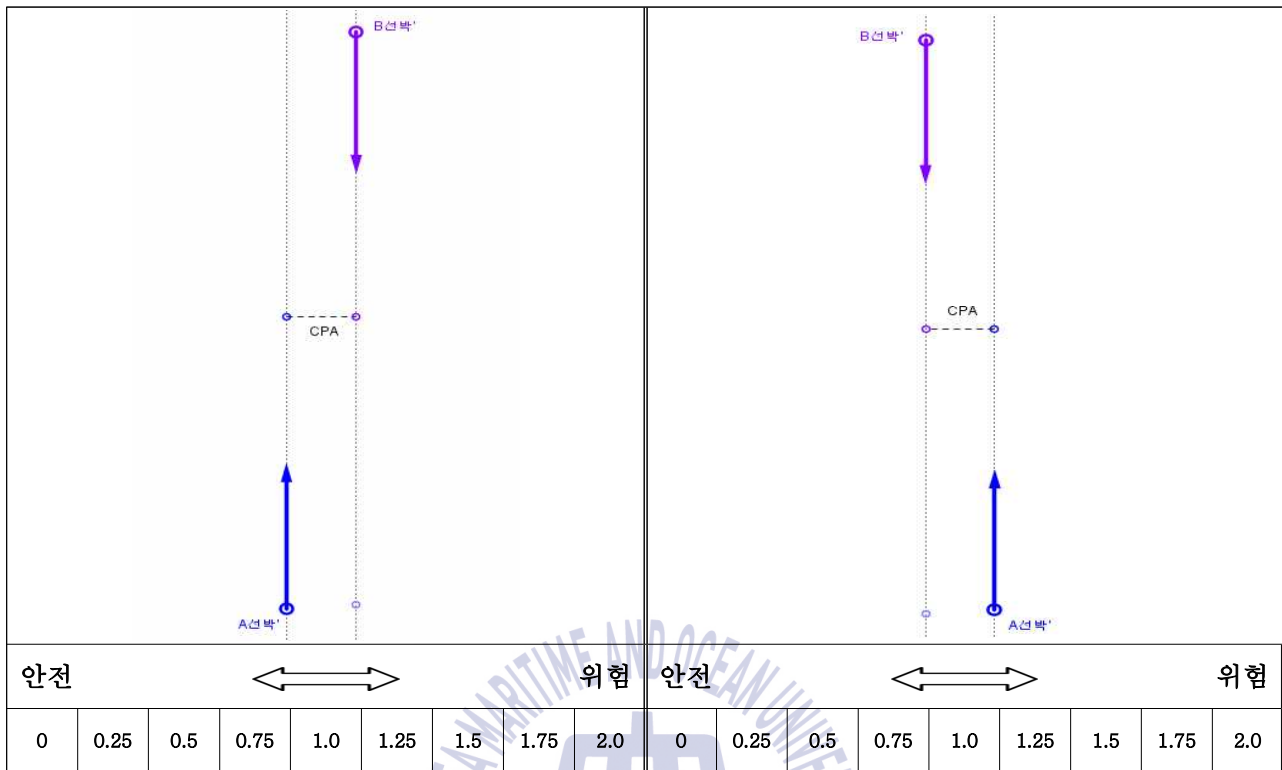
2. 선박조우상황에 따른 충돌위험도 조사

이 설문은 동일한 CPA와 TCPA를 가진 두 선박이 조우할 때, 제 3자(VTS) 관점에서 충돌 위험을 인지하는 정도를 확인하기 위함입니다. 두 선박이 다음과 같은 조건으로 조우한다고 생각하고 각 상황에 대하여 본인이 느끼는 위험의 정도를 판단하여 체크(✓, 0 ~ 2.0)하여 주시기 바랍니다.

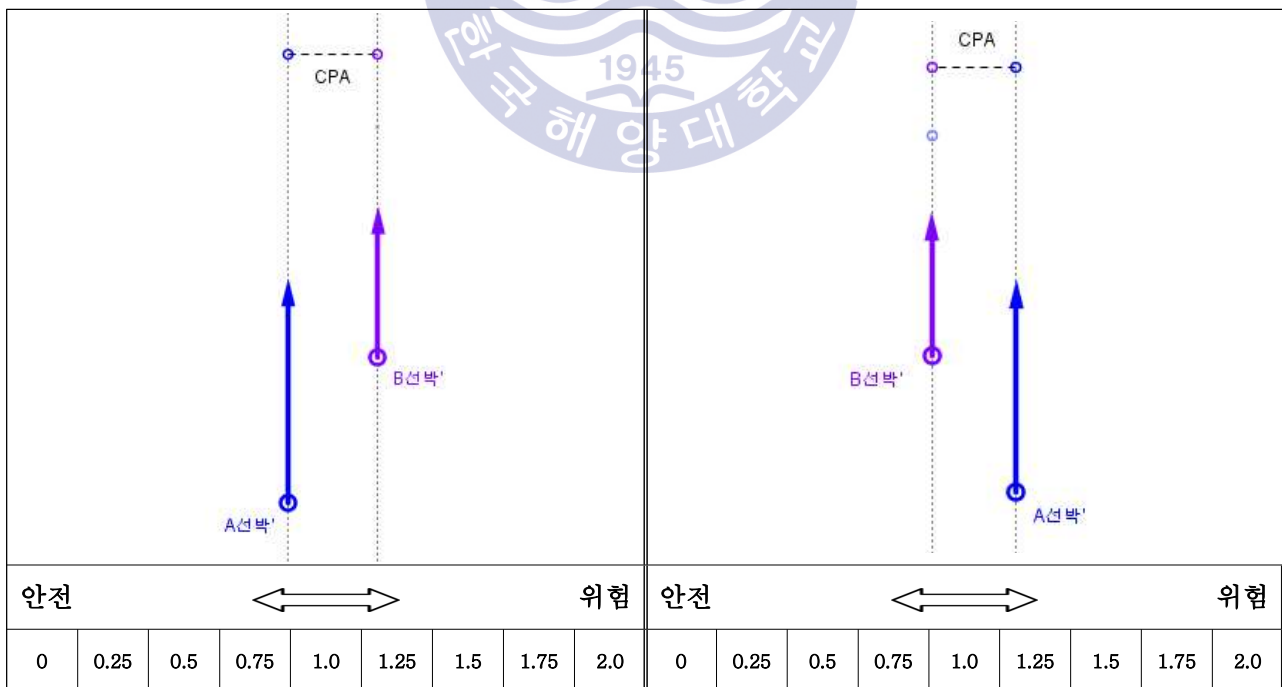
<조 건>

- ① 두 선박의 CPA=0.2마일, TCPA=6분임
- ② 그림과 같은 상황까지 두 선박에선 어떠한 조치도 없었음(변침, 감속 등)
- ③ 두 선박의 선종(일반화물선)과 톤수(5,000톤)는 동일하다고 가정
- ④ 항법관계에 따른 유지선, 피항선, 추월선, 피추월선 관계 고려

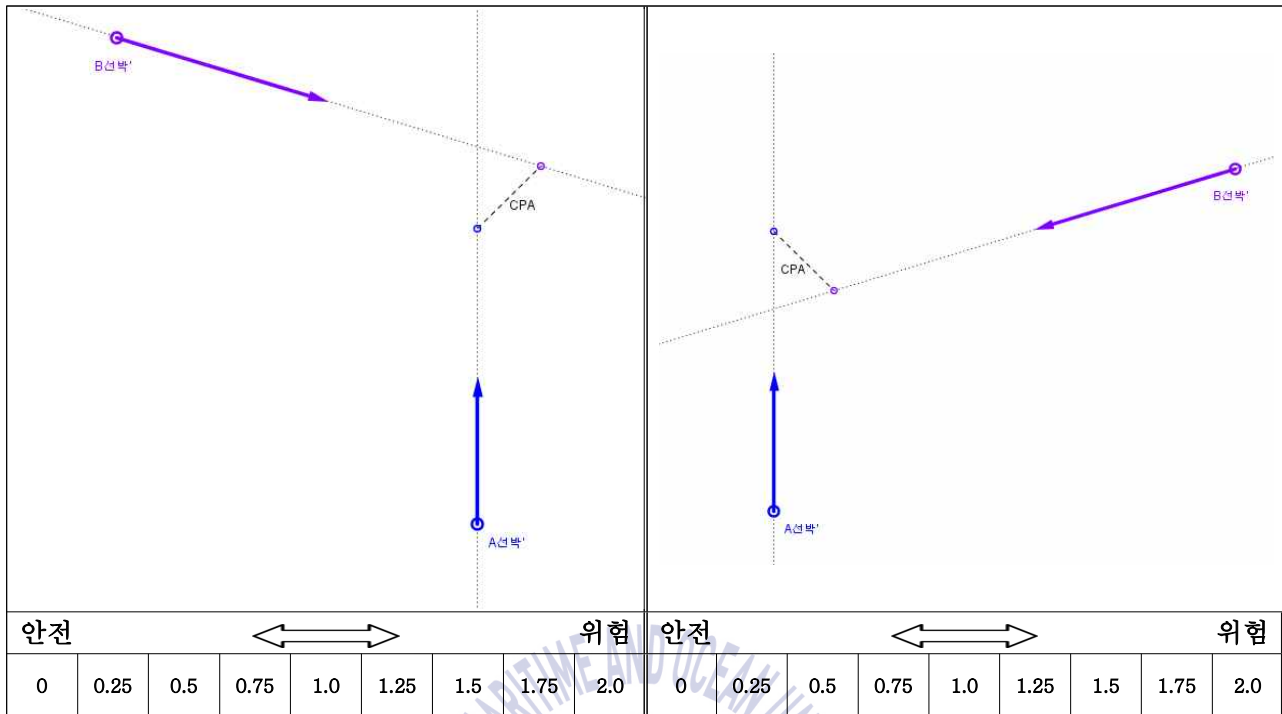
(1) A속력=B속력=10kts



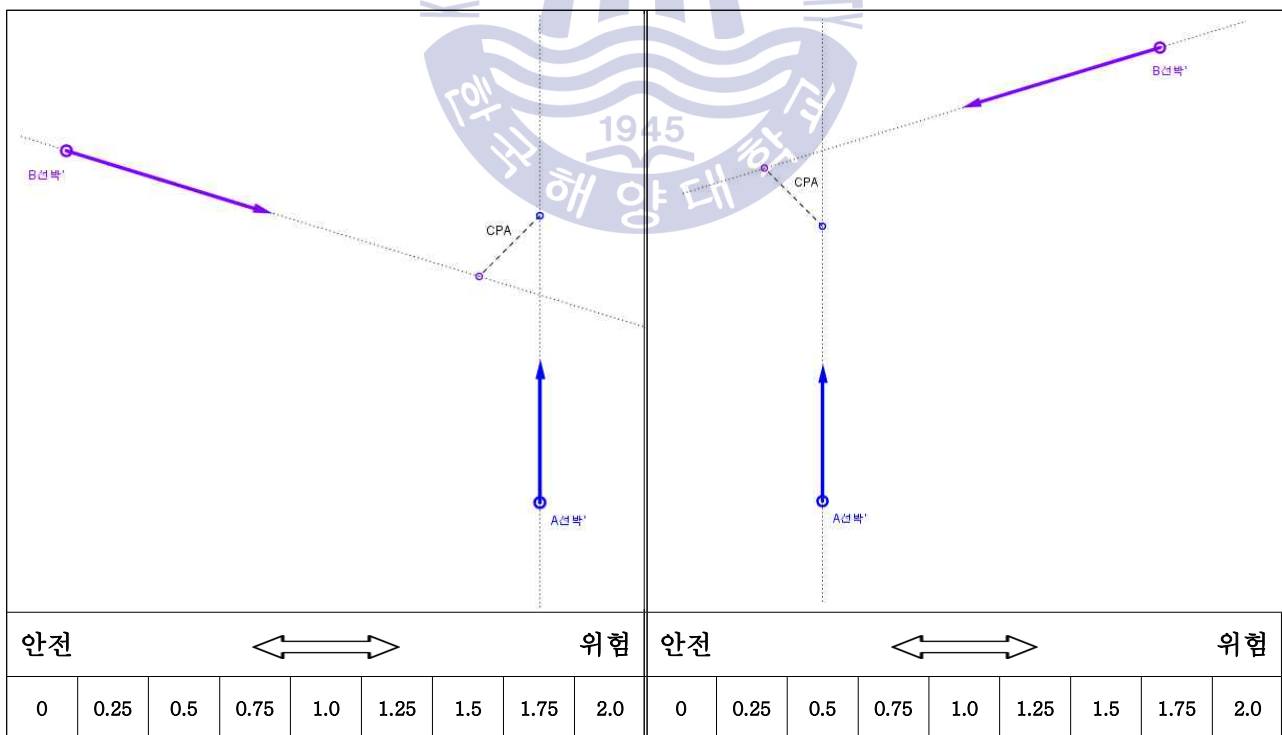
(2) A속력=10kts, B속력=7kts



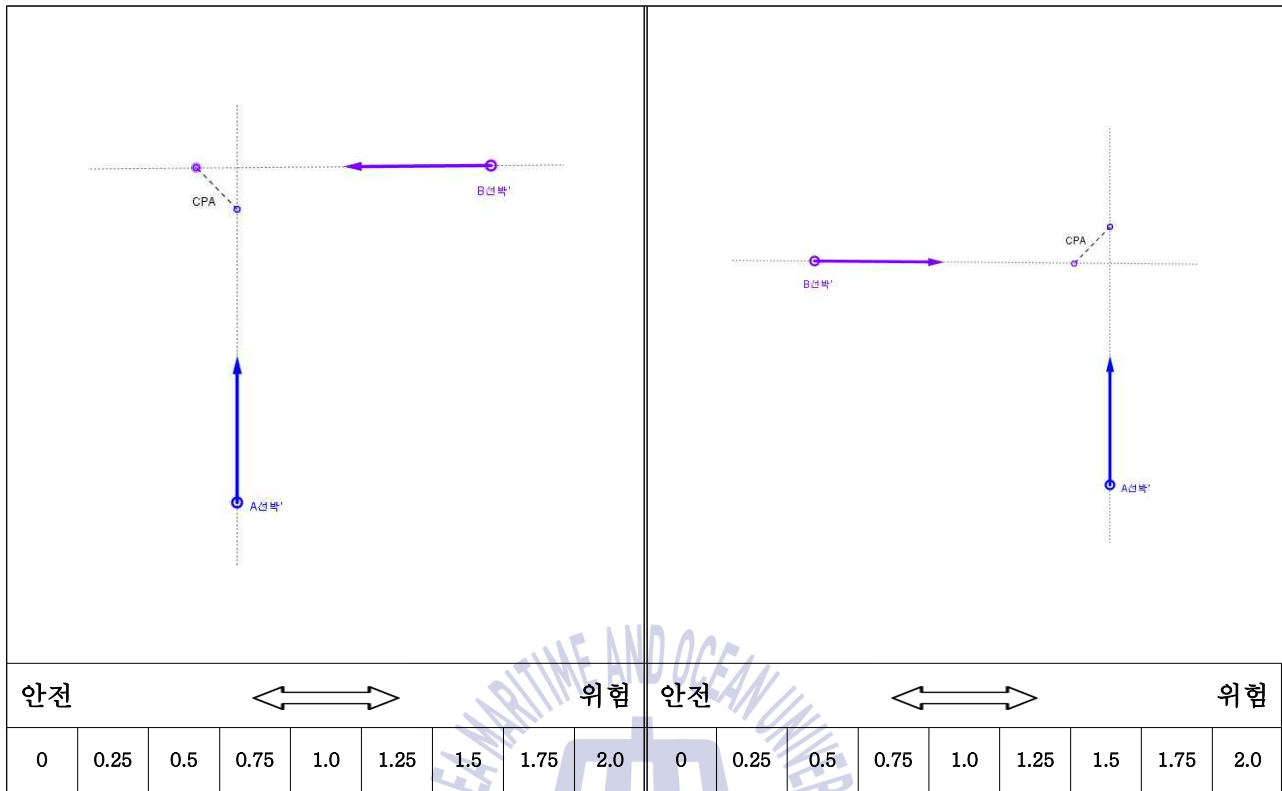
(3) A속력=10kts, B속력=15kts



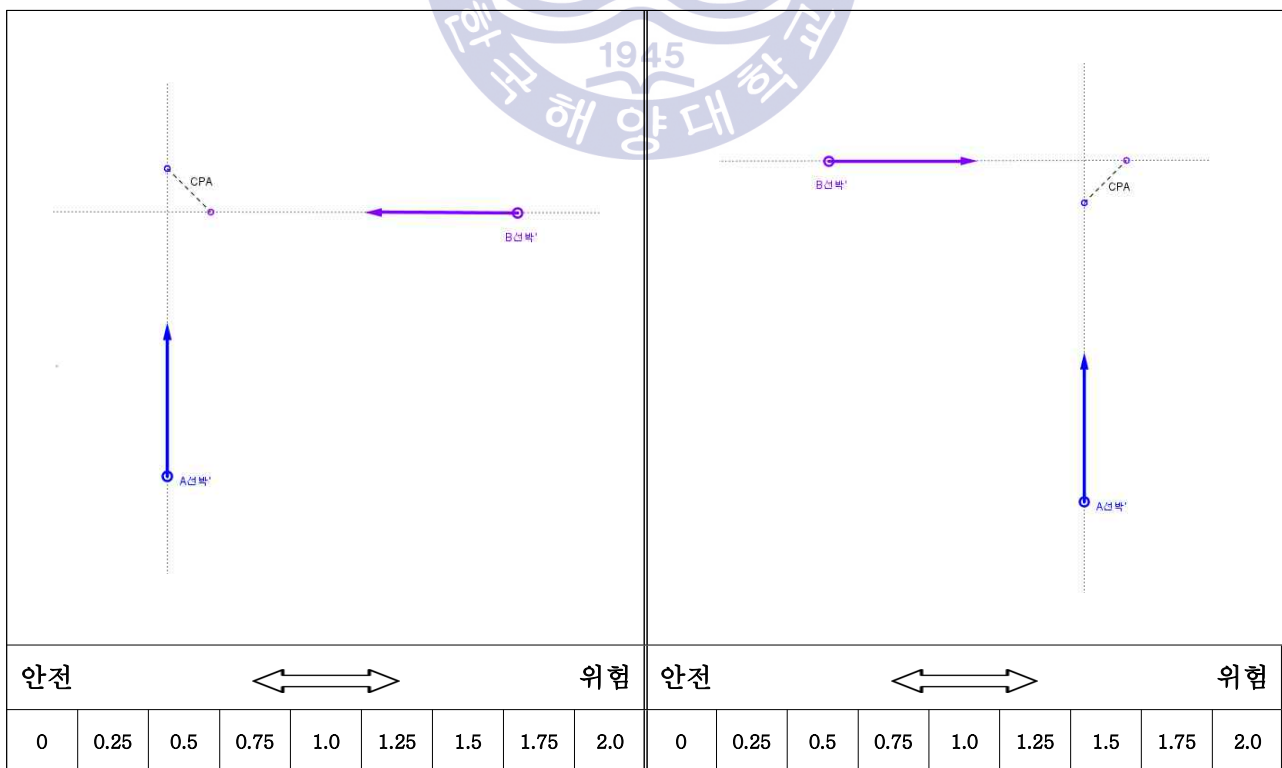
(4) A속력=10kts, B속력=15kts



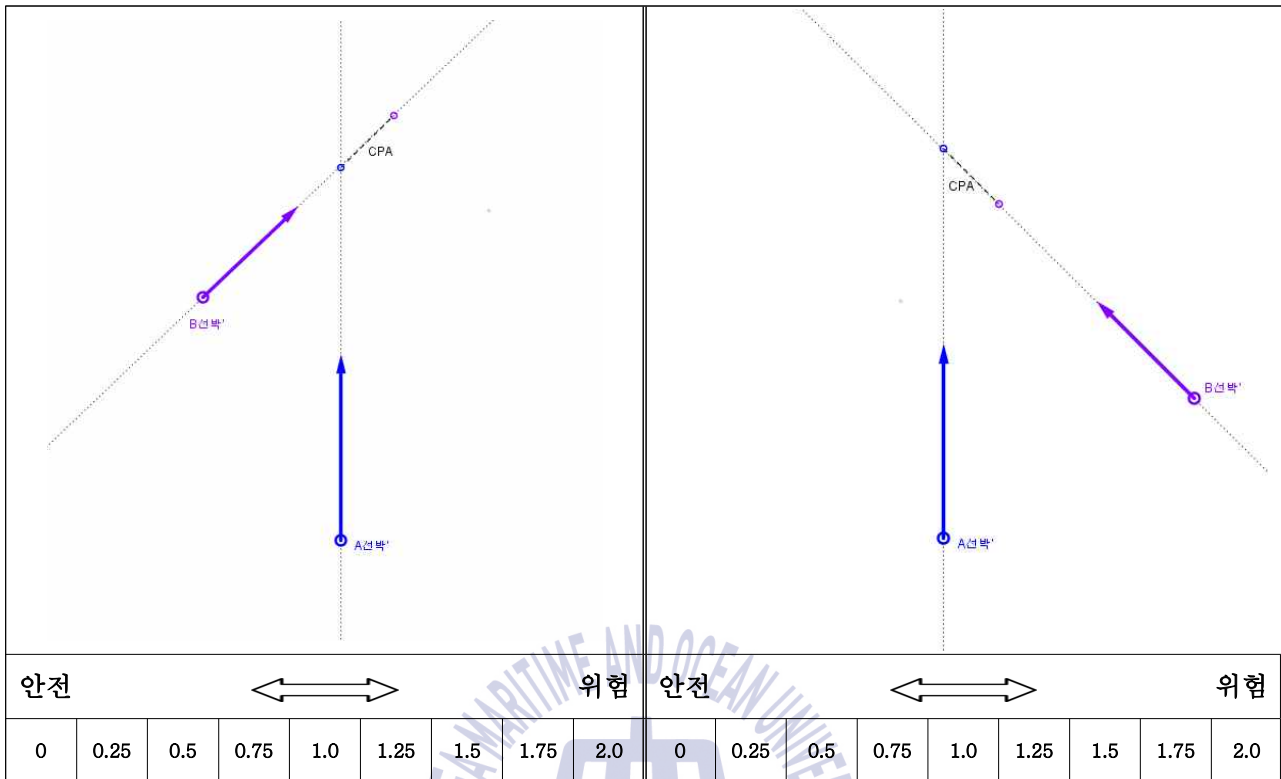
(5) A속력=10kts, B속력=10kts



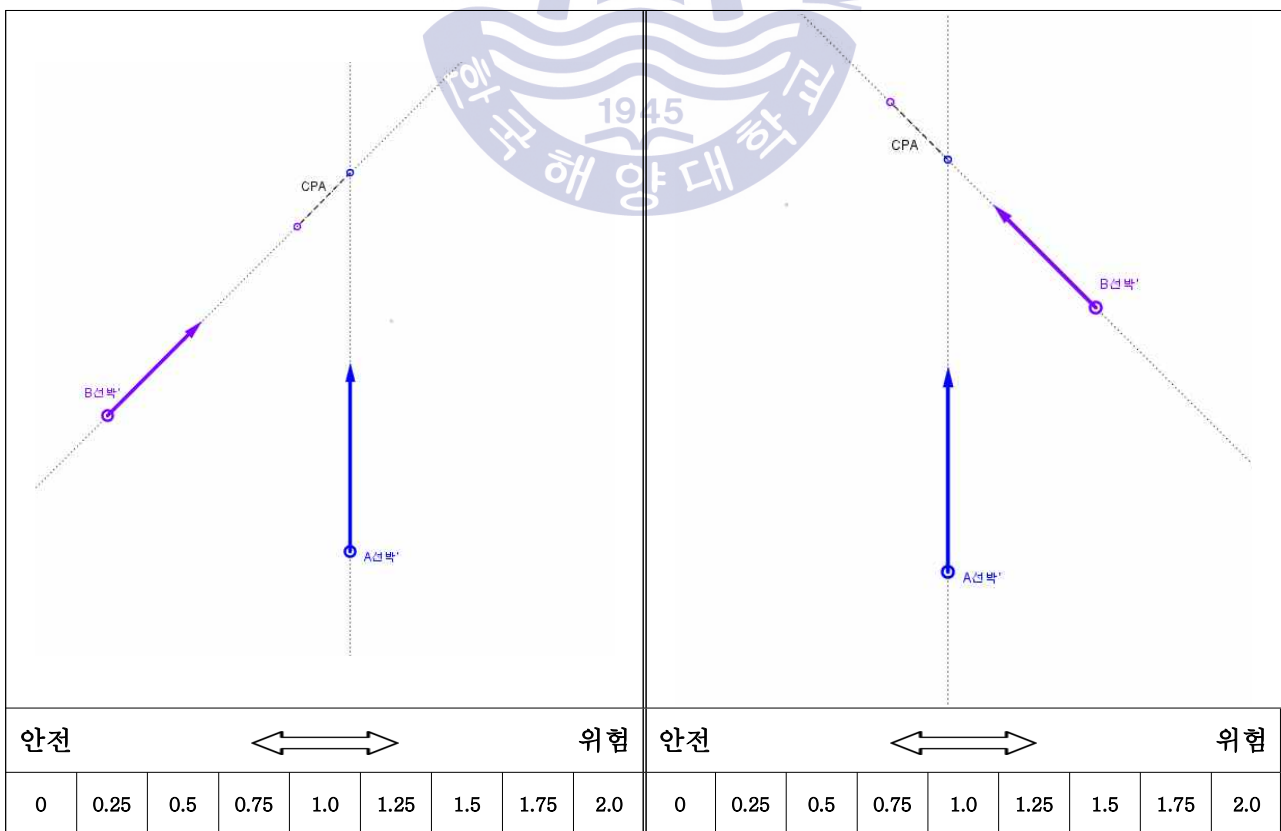
(6) A속력=10kts, B속력=10kts



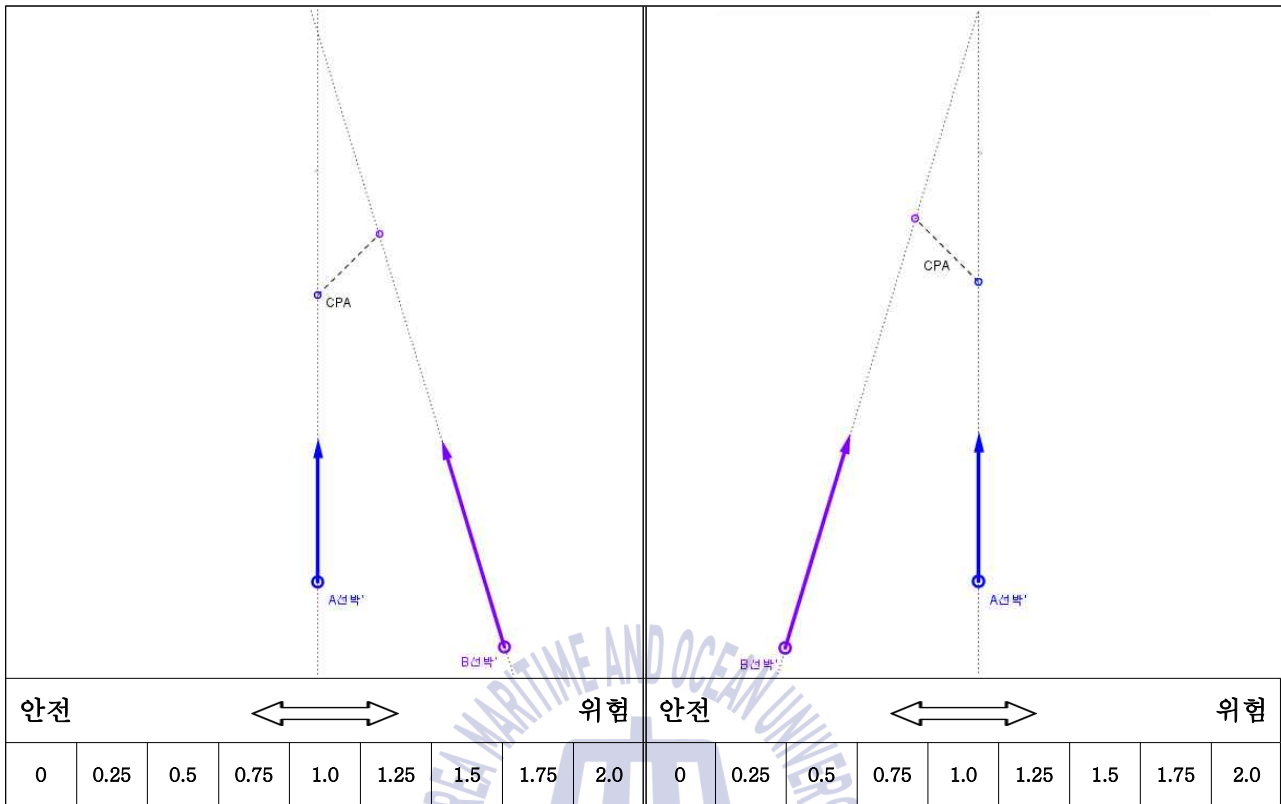
(7) A속력=10kts, B속력=7kts



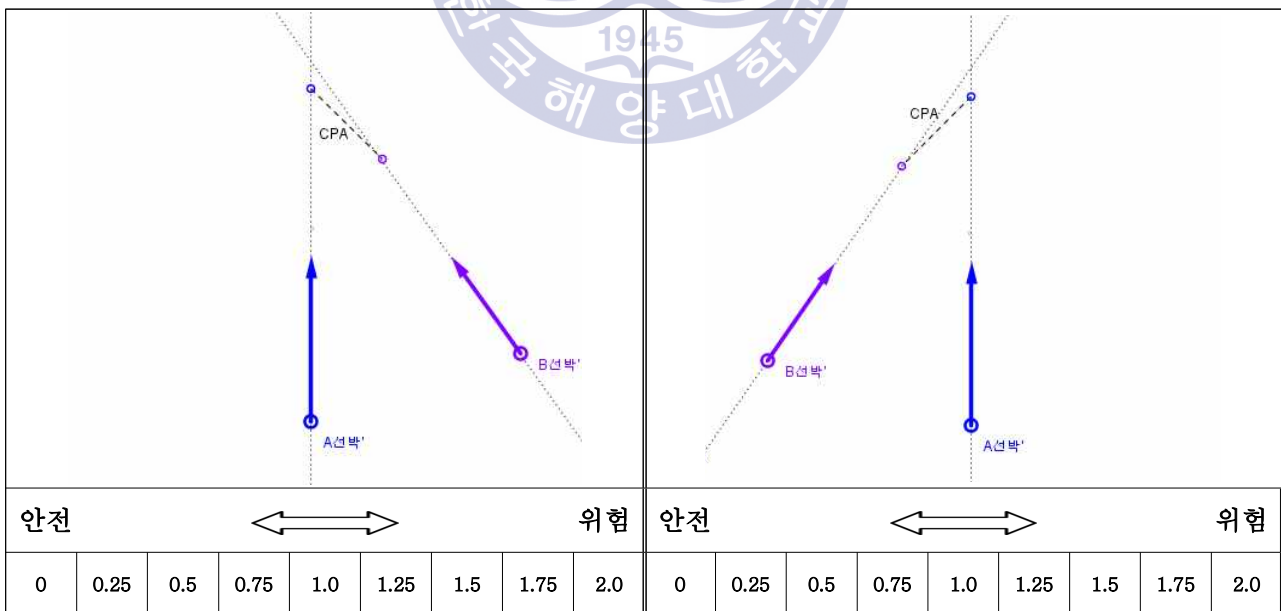
(8) A속력=10kts, B속력=7kts



(9) A속력=10kts, B속력=15kts



(10) A속력=10kts, B속력=7kts



부록 II. 여유시간과 이격거리에 따른 선박충돌위험 연구 설문지

안녕하십니까?

본 설문조사는 개별 선박의 관점이 아닌 **제 3자의 관점**에서 각각의 교차상황에서 충돌임박까지의 남아있는 **여유시간**과 최근접점에서의 두 선박의 **이격거리**에 따라 관제사 또는 항해사가 느끼는 **충돌위험정도**를 조사하기 위한 설문입니다.

교통 환경은 항만에 인접한 연안 해역을 기준으로 양 선박이 제시된 설문의 그림과 같이 통과할 때, 응답자가 느끼는 위험의 정도를 표시하시면 됩니다.

이 조사는 무기명으로 실시되고, 그 결과는 통계적으로 처리되므로 개인의 응답 내용은 절대 비밀이 보장됩니다. 또한 조사결과는 순수한 학술목적 이외에는 사용 되는 않습니다.

설문내용에서 평소 본인이 생각하고 느끼고 계신대로 성실하게 답변 부탁드립니다.



2016년 6월 20일

* 지도교수

한국해양대학교 항해학부 송 재 욱

* 설문조사 담당자

한국해양대학교 대학원 항해학과(박사과정)

부산항 해상교통관제센터 이 진 석

* 설문관련 문의처

☎ 010-5093-2414

e-mail : jslee118@gmail.com

1. 기초 자료 조사

1. 귀하의 성별은?

- ① 남자 ② 여자

2. 귀하의 연령은?

- ① 20대 ② 30대 ③ 40대 ④ 50대 ⑤ 60대 이상

3. 귀하께서 재직하시는 분야의 근무경력은?

- ① 5년 이하 ② 6년 ~ 10년 ③ 11년 ~ 15년 ④ 16년 ~ 20년 ⑤ 21년 이상

4. 귀하가 근무하는 분야는?

- ① 해운선사 ② 항해사(선장 포함) ③ VTS ④ 기타

5. 귀하의 직책은?

- ① 부장, 과장 이상 ② 대리, 사원 ③ 선장 ④ 1등 항해사 ⑤ 2등, 3등 항해사
⑥ 관제센터장 ⑦ 관제팀장 ⑧ 관제사 ⑨ 기타()

6. 귀하가 소지한 항해사 면허는?

- ① 1급 ② 2급 ③ 3급 ④ 4급 이하

7. 귀하의 승선경력 및 최종 직책은?

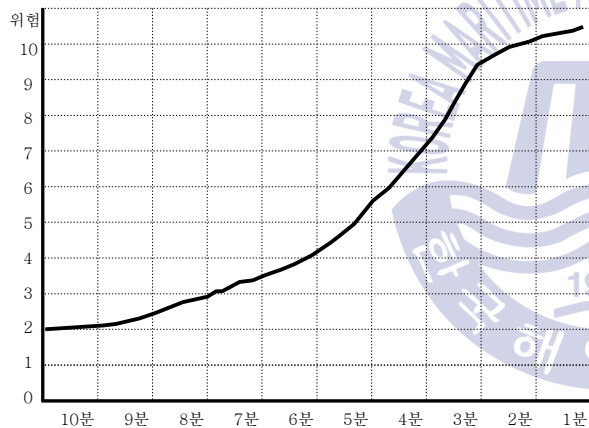
2. 여유시간에 따른 충돌위험도 조사

두 선박이 아래와 같은 조건하에서 각 그림과 같은 상황이 전개가 될 때, 제 3자(VTS)의 관점에서 양 선박이 충돌임박까지 남아있는 시간(1분~10분)에 따라 본인이 관제사로써 개입을 하게 될 때 느끼는 위험의 정도(0 ~ 10)를 판단하여 그래프로 그려주시기 바랍니다.

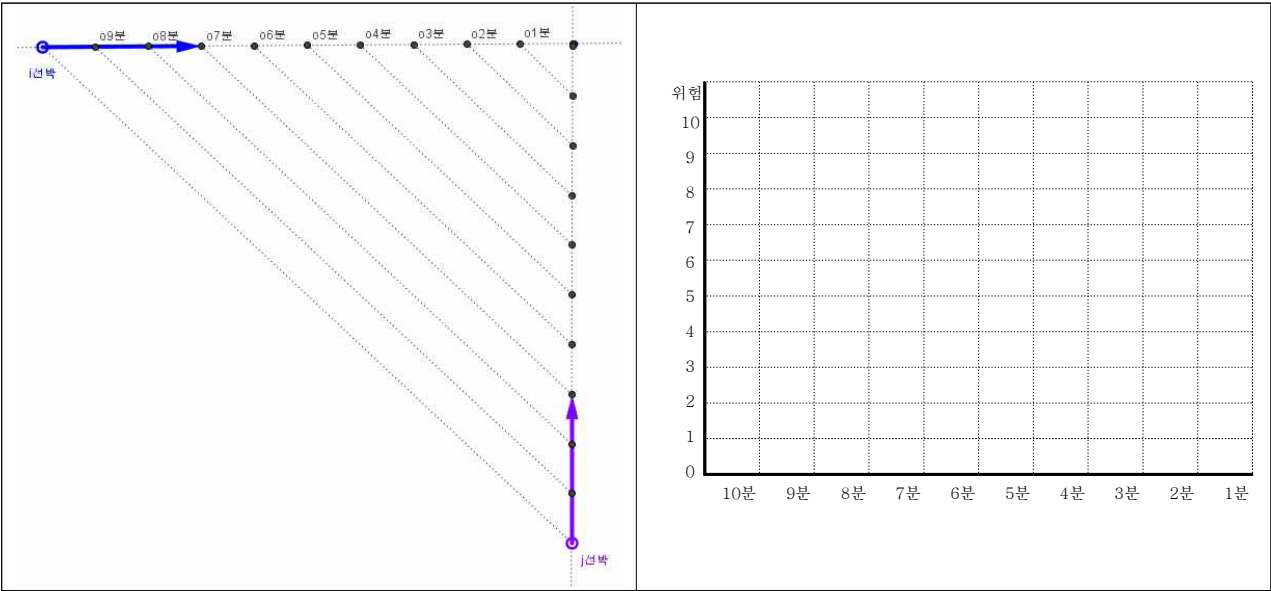
<조 건>

- ① 두선박의 CPA=0마일임
- ② 두 선박에서는 별다른 조치 없이 계속 진행(변침, 감속 등)
- ③ 벡터의 길이는 3분임

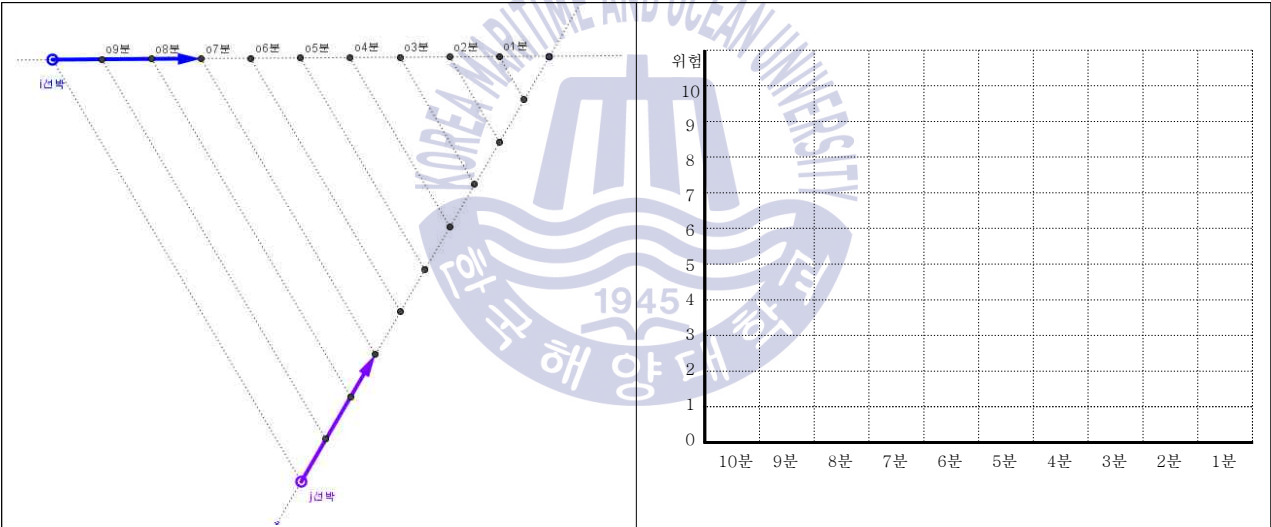
<그래프 작성 예>



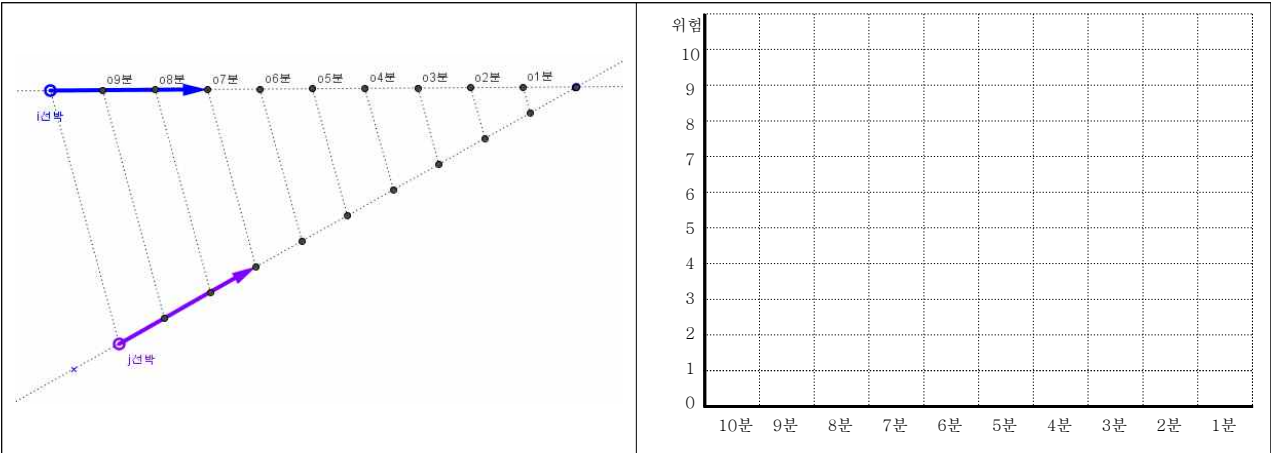
Q. 2-1



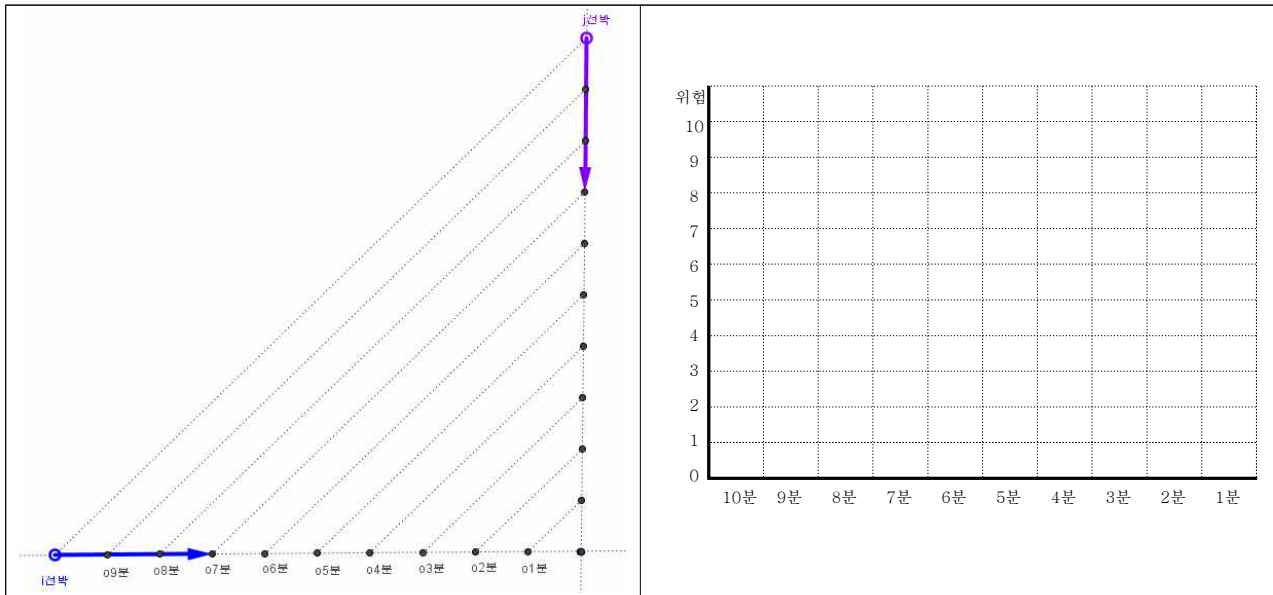
Q. 2-2



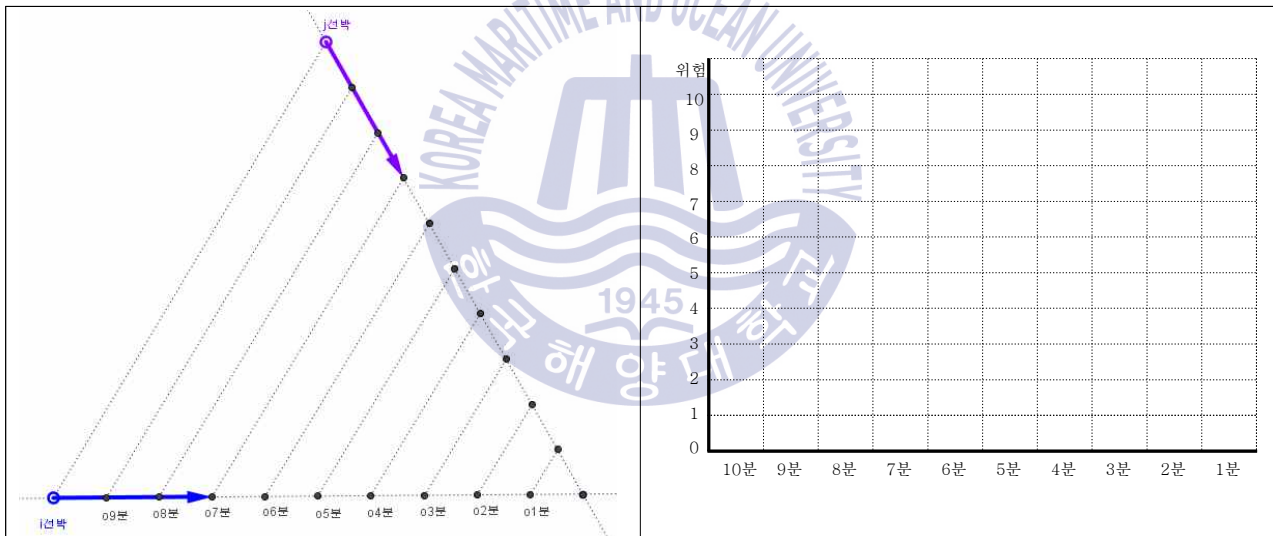
Q. 2-3



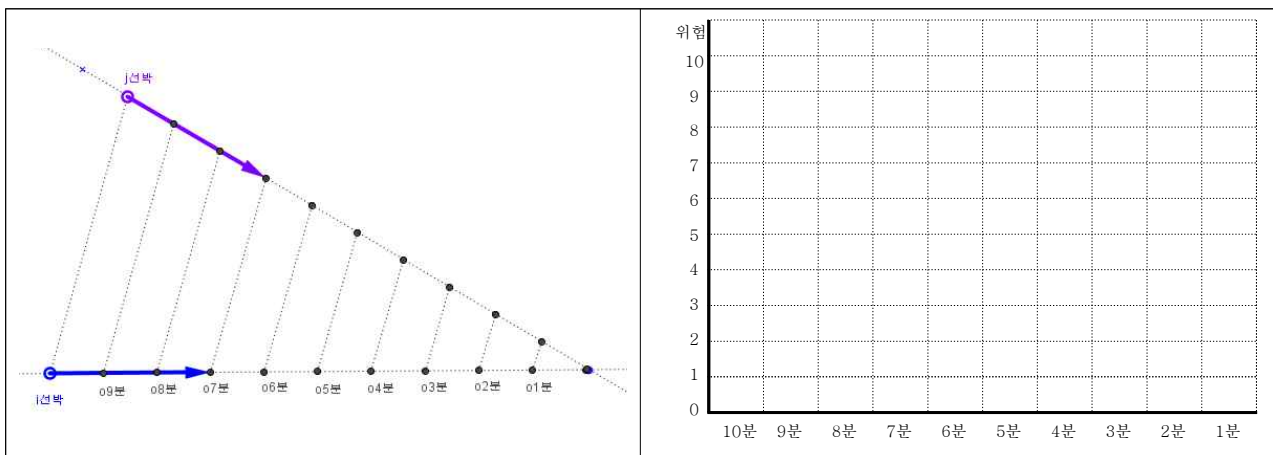
Q. 2-4



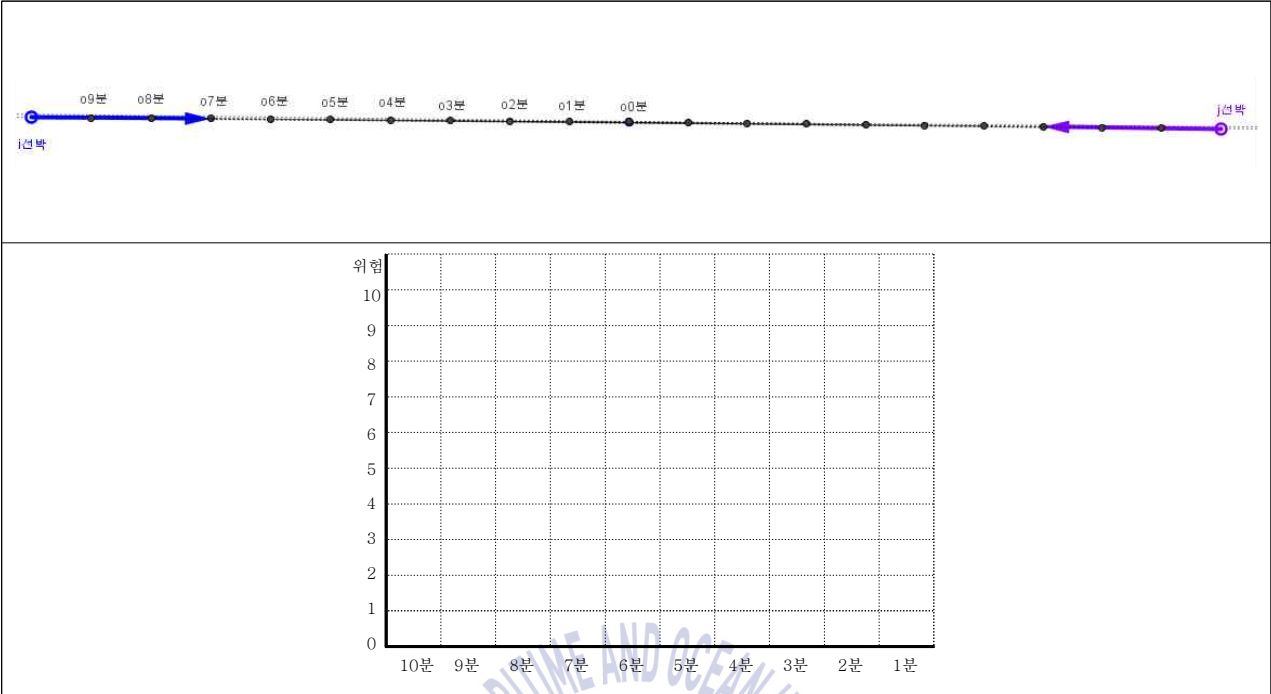
Q. 2-5



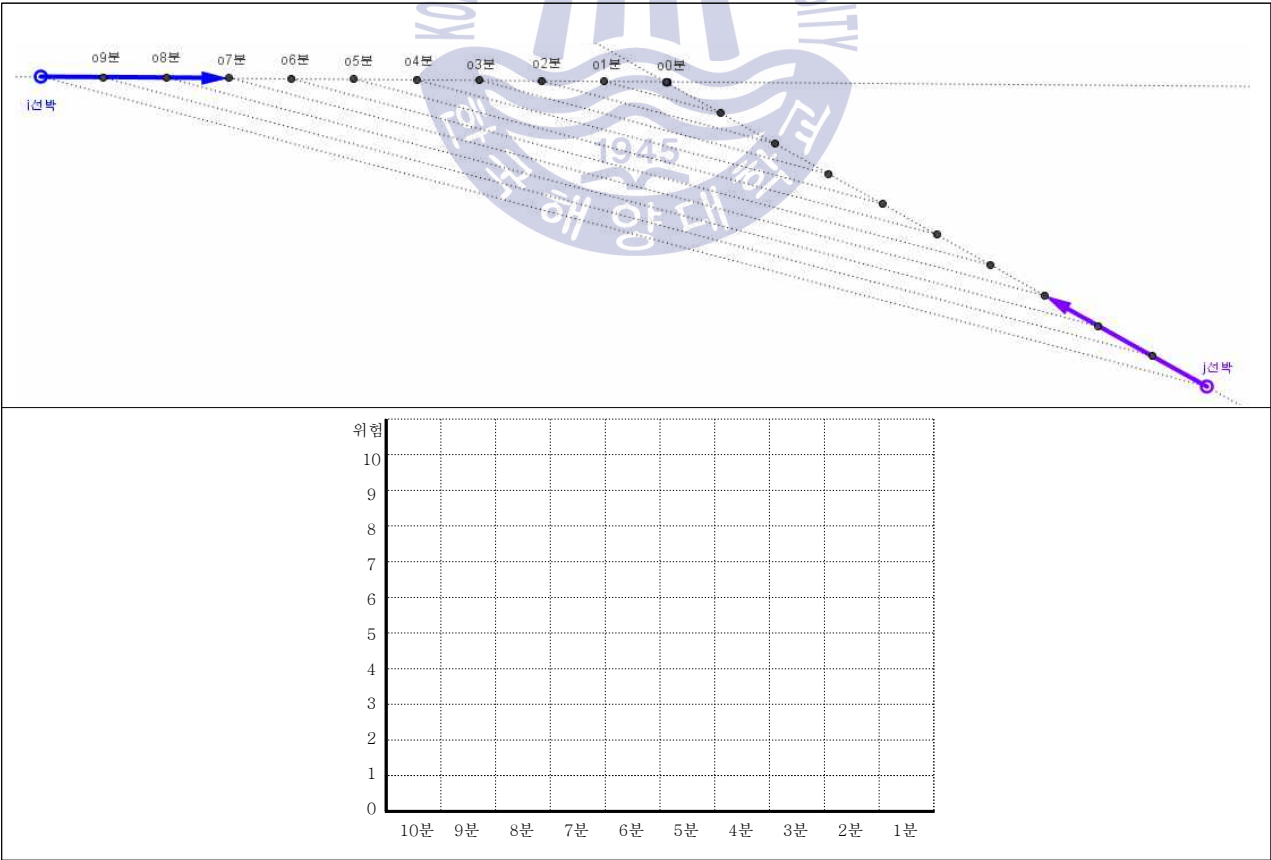
Q. 2-6



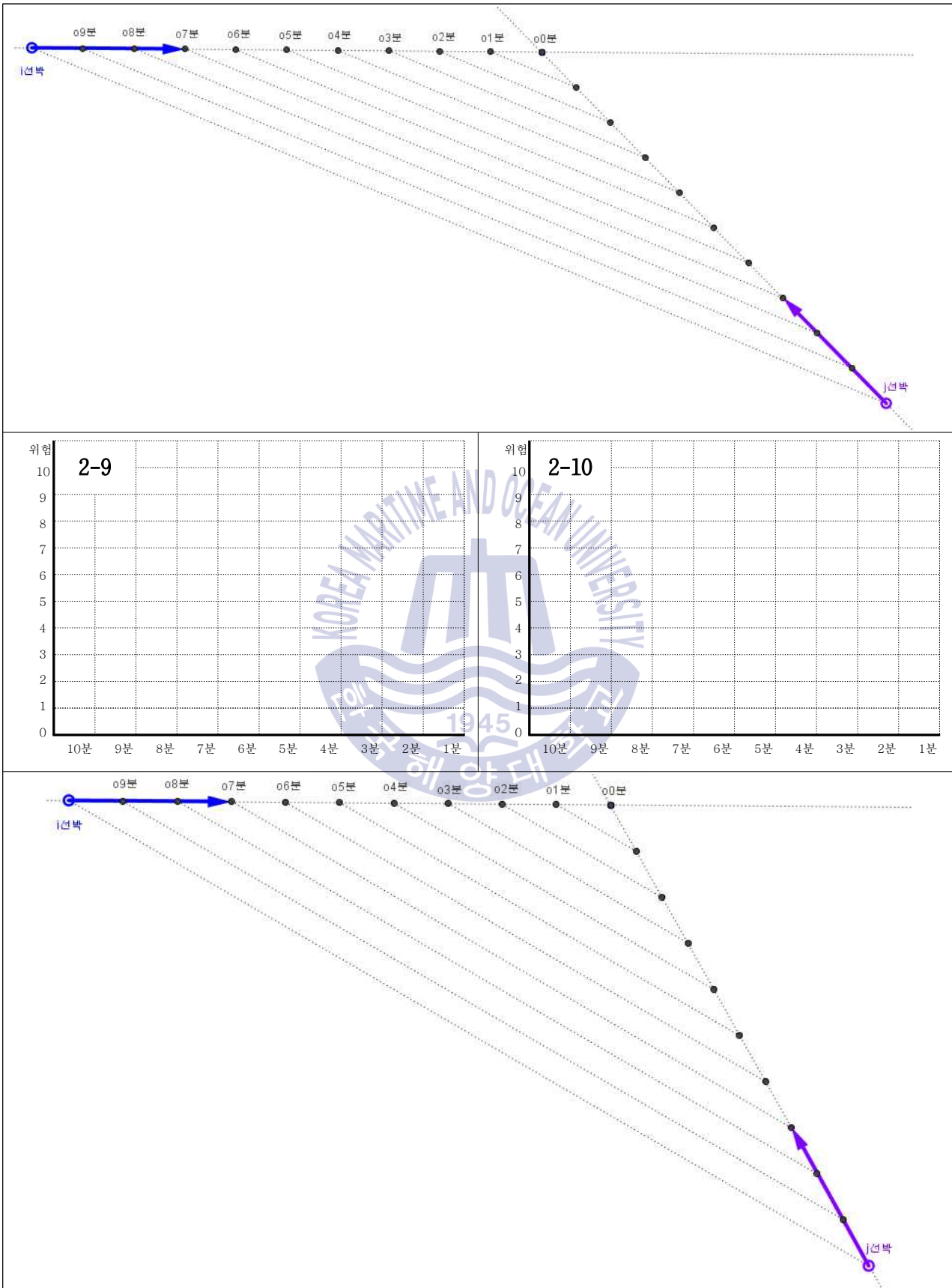
Q. 2-7



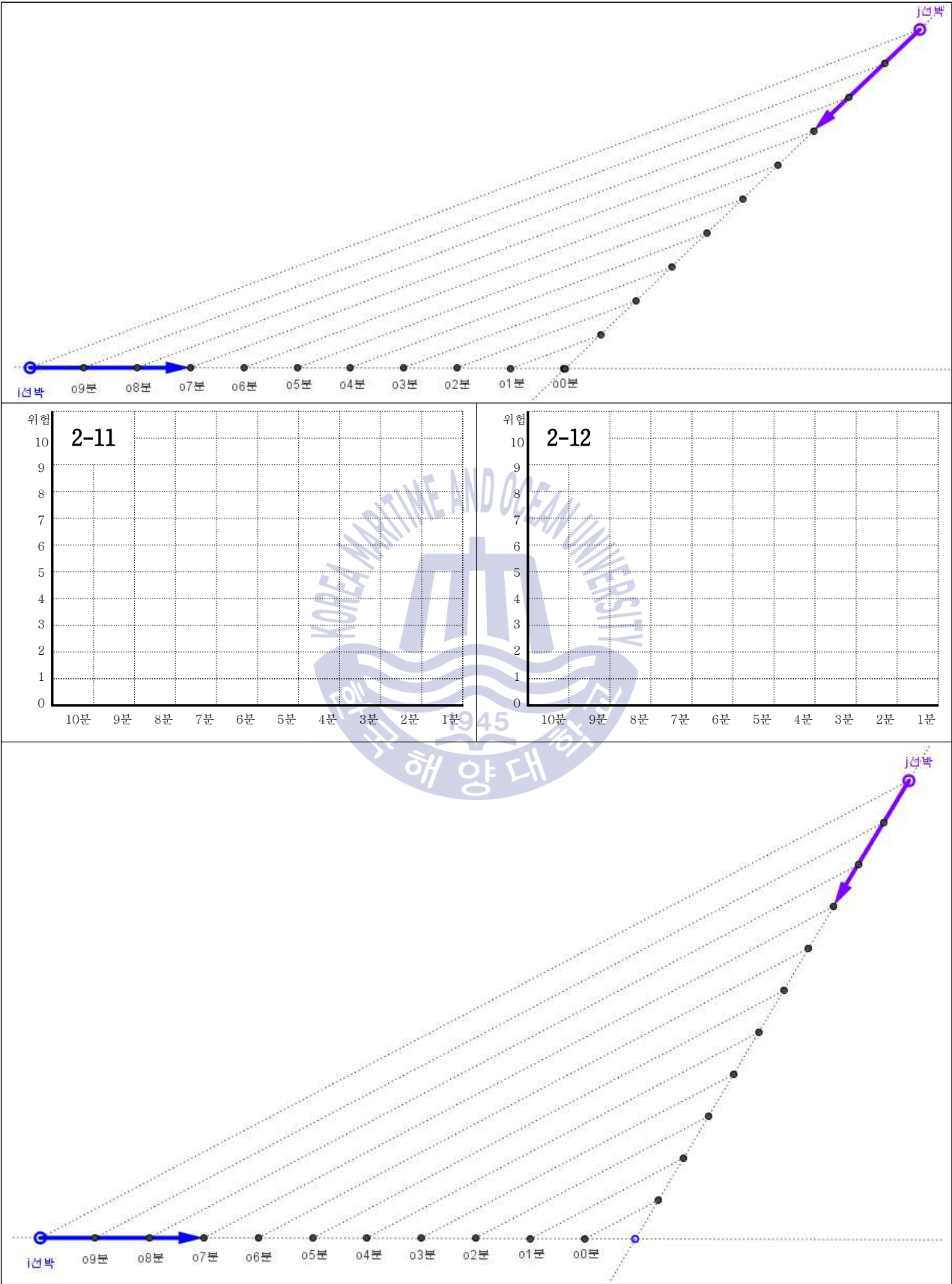
Q. 2-8



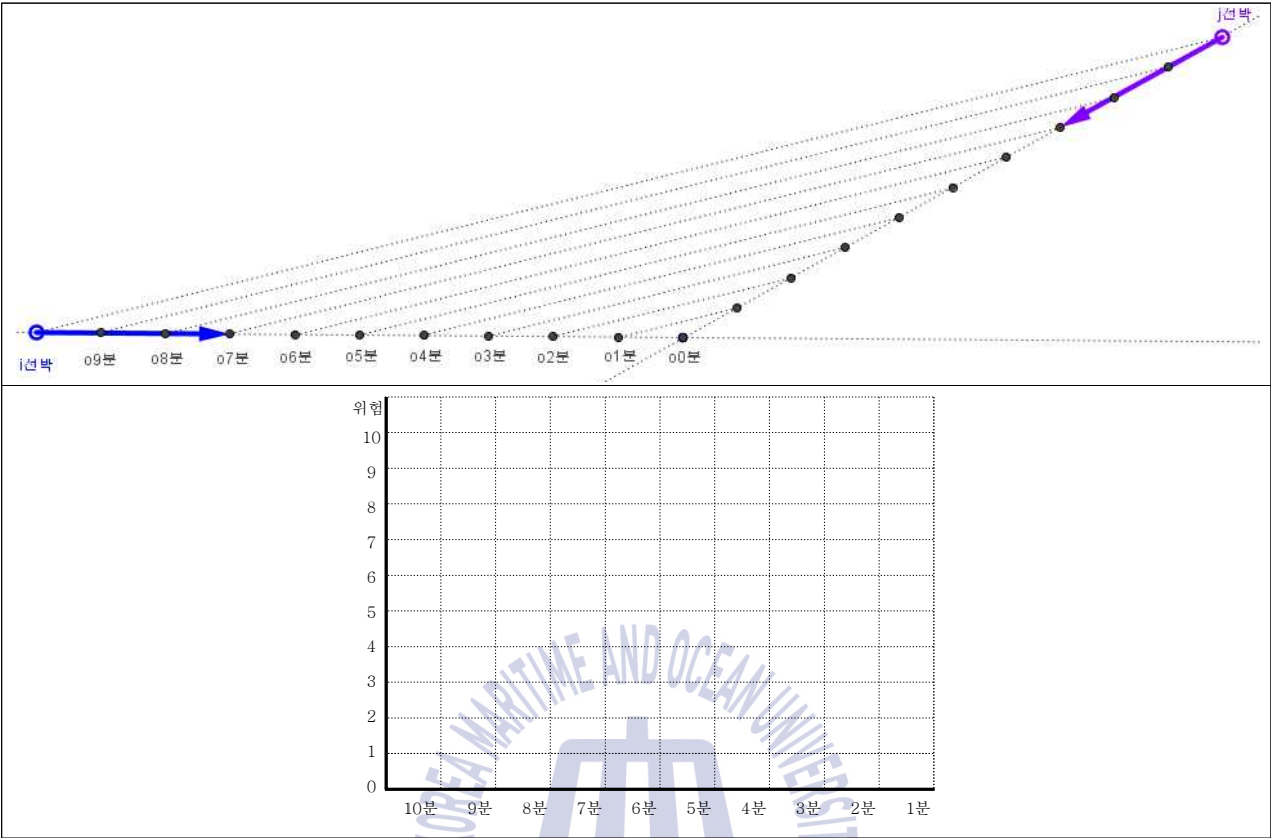
Q. 2-9(위), 2-10(아래)



Q. 2-11(위), 2-12(아래)



Q. 2-13



Q. 2-14 앞서 설문에서 **다음의 요인**을 함께 고려한다면 본인이 느끼는 위험정도(그래프 결과)는 어느 정도 영향을 미친다고 보십니까?

- ① 아주 많음 ② 많음 ③ 보통 ④ 적음 ⑤ 아주 적음

- 다 음 -

| | | | | |
|------------------|-------------------------|----------|-----------|-----------|
| 선종(Type) | 선박길이(LOA) | 선폭(Beam) | 시간대(Time) | 흘수(Draft) |
| 기타() | ❖ AIS에서 확인 가능한 선박 주요정보임 | | | |

Q. 2-15 2-14의 다음에서 그래프 결과에 가장 많은 영향을 미치는 **요인**을 아래표에 순서대로 작성하고, 그 비율과 증감여부를 작성하여 주십시오.(비교참조)

| 순위 | 요 인 | 미치는 영향(%) | 증감여부 | 비 고 |
|----|-----|-----------|------|--|
| 1 | | | | ❖ 다음의 각 요인이 앞서 설문에서 그린 그래프에 어느 정도 영향을 미치는지를 퍼센트(%)로 작성 ❖ 작성 예로 “선종, 5%, 증가” 라 하면 여러분이 그린 그래프의 위험정도가 선종에 따라 최대 5% 증가한다고 보시면 됩니다. |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |

Q. 2-16 (2-1~2-13)과 같은 상황에서 **선종(Type of ship)**이 미치는 영향을 고려할 때, 다음에서 위험도가 높은 순위와 비율을 아래표에 작성하여 주시기 바랍니다. (작성한 비율의 총 합은 100%임)

- 다 음 -

| | | | | |
|--------|--------|-----|-----|-----|
| 일반화물선 | 컨테이너선 | 유조선 | 어선 | 예부선 |
| 자동차운반선 | 케미컬운반선 | 여객선 | 병커선 | 함정 |

| 순위 | 선종 | 비율(%) | 순위 | 선종 | 비율(%) |
|----|----|-------|----|----|-------|
| 1 | | | 6 | | |
| 2 | | | 7 | | |
| 3 | | | 8 | | |
| 4 | | | 9 | | |
| 5 | | | 10 | | |

Q. 2-17 (2-1~2-13)과 같은 상황에서 선박길이(LOA)가 미치는 영향을 고려할 때, 다음에서 위험도가 높은 순위와 비율을 아래표에 작성하여 주시기 바랍니다. (작성한 비율의 총 합은 100%임)

- 다 음 -

| | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| ① 50m 이하 | ② 50m 이상 ~ 100m 이하 | ③ 100m 이상 ~ 150m 이하 |
| ④ 150m 이상 ~ 200m 이하 | ⑤ 200m 이상 ~ 300m 이하 | ⑥ 300m 이상 |

| 순위 | 선박길이 | 비율(%) | 순위 | 선박길이 | 비율(%) |
|----|------|-------|----|------|-------|
| 1 | | | 4 | | |
| 2 | | | 5 | | |
| 3 | | | 6 | | |

Q. 2-18 (2-1~2-13)과 같은 상황에서 선폭(Beam)이 미치는 영향을 고려할 때, 다음에서 위험도가 높은 순위와 비율을 아래표에 작성하여 주시기 바랍니다. (작성한 비율의 총 합은 100%임)

- 다 음 -

| | | |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| ① 5m 이하 | ② 5m 이상 ~ 10m 이하 | ③ 10m 이상 ~ 15m 이하 |
| ④ 15m 이상 ~ 20m 이하 | ⑤ 20m 이상 ~ 30m 이하 | ⑥ 30m 이상 |

| 순위 | 선폭 | 비율(%) | 순위 | 선폭 | 비율(%) |
|----|----|-------|----|----|-------|
| 1 | | | 4 | | |
| 2 | | | 5 | | |
| 3 | | | 6 | | |

Q. 2-19 (2-1~2-13)과 같은 상황에서 시간대(Time)가 미치는 영향을 고려할 때, 다음에서 위험도가 높은 순위와 비율을 아래표에 작성하여 주시기 바랍니다. (작성한 비율의 총 합은 100%임)

- 다 음 -

| | | |
|---------------|---------------|---------------|
| ① 00:00~04:00 | ② 04:00~08:00 | ③ 08:00~12:00 |
| ④ 12:00~16:00 | ⑤ 16:00~20:00 | ⑥ 20:00~24:00 |

| 순위 | 시간대 | 비율(%) | 순위 | 시간대 | 비율(%) |
|----|-----|-------|----|-----|-------|
| 1 | | | 4 | | |
| 2 | | | 5 | | |
| 3 | | | 6 | | |

Q. 2-20 (2-1~2-13)과 같은 상황에서 홀수(Draft)가 미치는 영향을 고려할 때, 다음에서 위험도가 높은 순위와 비율을 아래표에 작성하여 주시기 바랍니다. (작성한 비율의 총 합은 100%임)

- 다 음 -

| | | |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| ① 5m 이하 | ② 5m 이상 ~ 10m 이하 | ③ 10m 이상 ~ 15m 이하 |
| ④ 15m 이상 ~ 20m 이하 | ⑤ 20m 이상 ~ 30m 이하 | ⑥ 30m 이상 |

| 순위 | 홀수 | 비율(%) | 순위 | 홀수 | 비율(%) |
|----|----|-------|----|----|-------|
| 1 | | | 4 | | |
| 2 | | | 5 | | |
| 3 | | | 6 | | |

3. 이격거리에 따른 충돌위험도 조사

선박의 Safety domain에 관하여 그림1과 같이 다양한 연구가 진행되었습니다. 두 선박이 최대로 근접하여 통과하는 상황을 가정할 때, 아래 그림을 참고하여 귀하의 Safety Domain을 선박길이(L)로 환산하여 다음 표(Q3)에 그려주시고, 이때 위험 레벨(0~10)은 어느 정도인지 체크바랍니다.

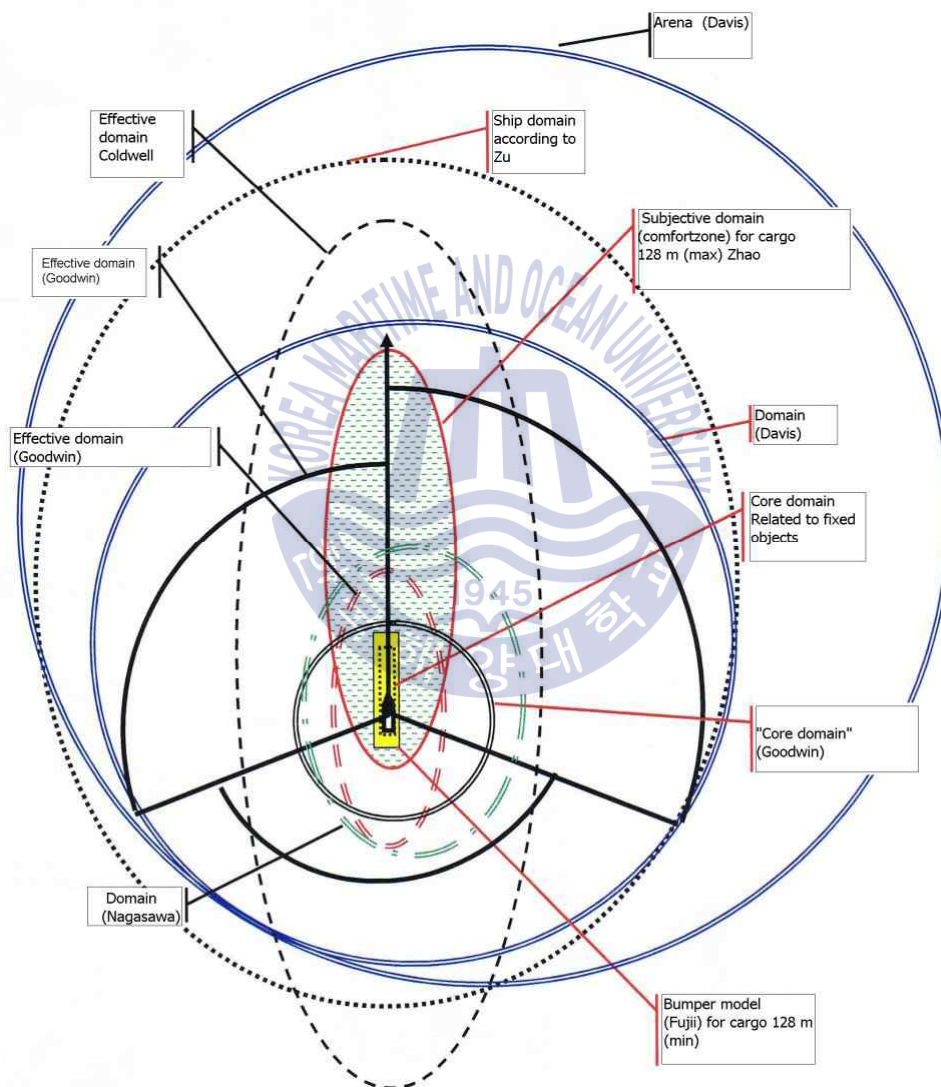
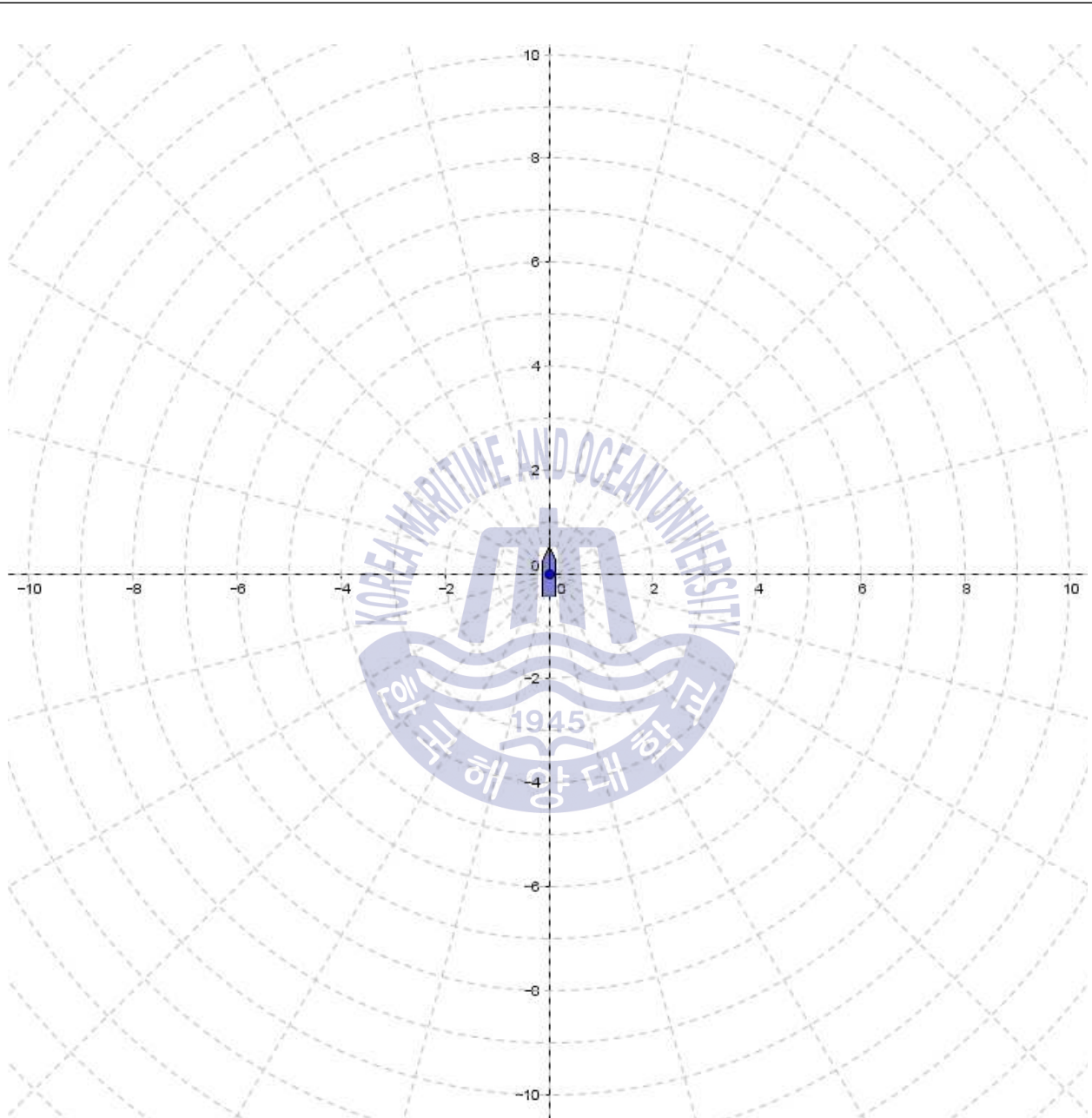


그림 1> Vessel safety domains

[참고 p.118, PIANC Report 121-2014, HARBOUR APPROACH CHANNELS DESIGN GUIDELINES]

Q3. 귀하의 Safety Domain을 아래 좌표에 선박을 중심으로 타원, 원 또는 다각형 등의 형태로 영역을 그리고, 이때 본인이 생각하는 위험 레벨(0~10)을 체크바랍니다. 즉, 타선박이 귀하가 그린 Domain 선상에 존재할 때 귀하가 느끼는 부담이 그 선까지는 매우 안전한 범위라면 0 또는 1, 보통이면 5, 매우 위험한 범위라면 9또는 10에 체크하시면 됩니다.



※ 눈금단위는 선박길이(L), 선수/우현 방향 (+), 선미/좌현 방향 (-)로 표기

<위험정도>

| 매우안전 | | | | | 보통 | | | 매우위험 | | |
|------|---|---|---|---|----|---|---|------|---|----|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |

감사의 글

VTS 및 선박 충돌 위험 분석에 대한 관심으로 대학원 박사과정을 진학하여 지난 6년 동안 인생에서 가장 알차고 보람된 시간을 보낸 것 같습니다.

논문 연구와 모델 개발을 위해 관련 논문을 찾아보고 막힌 해답을 찾기 위해 밤을 지새우면서 실마리를 찾아가는 연구의 즐거움을 느낄 수 있었습니다.

다행히 직장인 VTS 업무와 학교에서의 연구가 일관성이 있었고, 직장과 학교가 가깝게 위치하고 있어 비번일 때마다 연구실에서 학업을 지속할 수 있었습니다.

먼저 석사와 박사과정동안 연구의 중심과 방향을 바르게 잡아주시며, 바쁘신 와중에도 항상 열정적으로 연구에 대한 조언과 격려를 아끼지 않으시고, 질문 하나하나에 명쾌한 답이 나올 때 까지 연구에 전념할 수 있도록 독려하시고 지원해주신 지도교수 송재욱 교수님께 진심으로 감사드립니다.

바쁘신 가운데 부족한 제 논문 수정과 검토를 위해 작은 부분까지도 세심히 신경써주시고 석·박사과정 중에 열정적이고 변함없는 가르침으로 지도해주신 박진수 교수님, 예병덕 교수님, 박영수 교수님, 문성배 교수님에게도 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

그리고 박사과정 중에 연구실에서 많은 조언과 도움을 주신 이신철 박사님, 정민 교수님, 이정진씨, 송재섭씨, 박수지에게도 감사의 마음을 전합니다.

또한 직장생활에서 연구를 끝까지 할 수 있도록 많은 도움과 배려를 해 주신 하운주 센터장님을 비롯한 김명학 센터장님, 위영태 팀장님, 김태국 팀장님을 비롯한 우리 팀원 모두와 부산 VTS 모든 직원 분들과 현장에서 불철주야 해상 안전에 기여하고 계시면서 선박 충돌 위험과 관련된 설문에 적극적으로 동참해 주시고 도와주신 전국 해상교통관제사 직원 분들 모두에게 감사의 인사를 드립니다.

니다.

끝으로 회사와 학교를 번갈아 다니면서 가정에 소홀하여도 남편에 대한 믿음과 사랑으로, 그리고 늘 기도로 언제나 곁에서 힘이 되어 준 사랑하는 아내 연수와 밤늦게까지 연구한다고 잘 놀아주지 못했지만 아빠 힘내라고 언제나 밝게 웃어주고 기쁨이 되어준 사랑하는 딸 아름이, 아린이, 아라에게, 그리고 공부는 잘 되어 가는지 늘 격려해 주신 장인 장모님에게 감사를 드립니다.

그리고 지금은 이 세상에 계시지 않아 이 모든 기쁨과 감사를 함께 나눌 수 없지만 암 투병 가운데 계시면서도 자신보다 아들을 먼저 생각하시고 위하여 기도해주신 사랑하는 어머니께 깊은 감사를 드리고, 그토록 살아생전에 보시기를 원하셨던 졸업식을 하늘에 먼저 가 계신 아버지와 함께 보시고 기뻐하시리라 믿습니다.

끝으로 이 모든 일에 지혜와 명철을, 그리고 모든 환경과 여건을 허락하신 하나님께 이 영광을 돌립니다.

2017년 07월

이진석 드림